

# **Funktionell gefüllte Isolierwerkstoffe für Hochfeld-Gleichspannungs-Isoliersysteme in kompakten gasisolierten Anlagen**

Vom Fachbereich 18  
- Elektrotechnik und Informationstechnik -  
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

## **Dissertation**

von  
**Dipl.-Ing. Michael Tenzer**  
geboren am 22. März 1981 in Bensheim an der Bergstraße

Referent: Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger

Tag der Einreichung: 07. Juli 2014  
Tag der mündlichen Prüfung: 20. November 2014

D17  
Darmstadt 2015









# Vorwort

Die vorliegende Dissertation ist im Rahmen meiner Beschäftigung als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt entstanden.

Mein außerordentlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen für die Ermöglichung dieser Arbeit, die Idee zu diesem Forschungsprojekt und die fachliche Unterstützung sowie den gewährten Gestaltungsspielraum und das damit verbundene Vertrauen während meiner gesamten Tätigkeit am Fachgebiet Hochspannungstechnik. Herrn Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger, Technische Universität München, danke ich für das große Interesse an der Arbeit und für die Übernahme des Korreferats.

Diese Arbeit wurde durch die Siemens AG, Energy Sector finanziell unterstützt. Besonderer Dank geht an Dr. Hermann Koch, Dr. Denis Imamovic, Dr. Gernot Swiatkowski, Dr. Edelhard Kynast, Dr. Bernhard Lutz, Karsten Juhre, Dr. Steffen Lang und alle weitere Siemens-Mitarbeiter, welche in diesem Projekt involviert waren.

Großer Dank auch an alle weiteren Forschungspartner aus der Industrie, welche u.a. durch Fachdiskussionen sowie durch Bereitstellung von Material und Prüflingen zum Gelingen dieses Projekts beigetragen haben, insbesondere Herrn Michael Hagemeister, ABB Wettingen; Herrn Dr. Reinhold Rüger und Frau Dr. Sylke Klein, Merck KGaA Darmstadt; Herrn Dr. Jens Martin Seifert, Lapp Insulators GmbH Wunsiedel, Herrn Prof. Dr.-Ing. Claus Neumann, Amprion GmbH Dortmund und Herrn Thomas Dreßen, Momentive Duisburg.

Dem Laborleiter des Fachgebiets Hochspannungstechnik, Herrn Dr. Thomas Wietoska danke ich für die Unterstützung bei der Planung der Versuchsaufbauten und für den Aufbau diverser Sondergeräte für Hochspannungsversuchsaufbauten. Großer Dank an die Mechanikwerkstatt des Fachgebiets Hochspannungstechnik, insbesondere an Herrn Ulrich Veith für die großartige Unterstützung bei der Herstellung gefüllter Epoxidharz-Prüfkörper und bei der Planung der praktischen Versuchsaufbauten, Herrn Steffen Noll für die zahlreichen elektromechanischen Realisierungen in den Versuchsaufbauten und Herrn Frank Ullrich sowie Herrn Christian Homa für den Aufbau der automatisierten Alterungsversuchsstände und viele weitere mechanische und elektrische Aufbauten.

Vielen Dank dem Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe, Fachbereich Materialwissenschaften der Technischen Universität Darmstadt, insbesondere an

Herrn Raschid Baraki für die Ermöglichung diverser Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen und an Herrn Dr. Kyle Webber für die Messungen der thermischen Ausdehnung von gefüllten Polymeren.

Meinen Kollegen am Fachgebiet Hochspannungstechnik danke ich für die gute Zusammenarbeit, den fachlichen Austausch und den guten, freundschaftlichen Umgang. Hierbei möchte ich besonders Herrn Jan Oliver Debus für den regen Austausch im Themengebiet der Mikrovaristoren, Herrn Max Tuczek für die gemeinsame Planung der Langzeitversuchsstände und meinen ehemaligen Bürokollegen Dr. Patrick Halbach, Karsten Golde und Torsten Psotta für die vielen Ratschläge und Ermunterungen danken.

Herrn Axel Winter, ehemals Technische Universität München, danke ich für den guten fachlichen Austausch und die gemeinsamen wissenschaftlichen Veröffentlichungen.

Außerdem danke ich allen Studierenden, welche im Rahmen von Abschlussarbeiten oder HiWi-Tätigkeiten mit großem Engagement ihren Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Hierbei möchte ich die Herren Sebastian Karach, Henning Janssen, Maximilian Secklehner, Peter Hock und Sören Hedtke besonders positiv hervorheben.

Meiner Familie, insbesondere meiner Mutter, danke ich für die Ermöglichung meines Studiums und für die Unterstützung während meiner Promotion.

Darmstadt, im Juli 2014  
Michael Tenzer

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen, Konstanten und Abkürzungen</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen und Stand des Wissens</b>	<b>5</b>
2.1 Einführung zu Isolatoren in gasisolierten Anlagen . . . . .	5
2.2 Aufbau von Isolatoren in gasisolierten Anlagen . . . . .	6
2.2.1 Bauformen von Isolatoren für gasisolierte Anlagen . . . . .	7
2.2.2 Stütz-Isolatoren . . . . .	8
2.3 Elektrische Feldverteilung an Isolatoren . . . . .	10
2.4 Ladungsträgerakkumulation . . . . .	12
2.5 Füllstoffe . . . . .	16
2.5.1 Erhöhung der Leitfähigkeit polymerer Isolierwerkstoffe . . . . .	17
2.5.2 Mikrovaristoren . . . . .	18
2.5.3 Partikel mit nanoskaliger dotierter Zinnoxidbeschichtung . . . . .	24
<b>3 Ziele der Arbeit</b>	<b>29</b>
<b>4 Funktionell gefüllte Isolierwerkstoffe für DC-GIS-Isoliersysteme</b>	<b>33</b>
4.1 Anforderungen an den Isolierwerkstoff . . . . .	33
4.2 Auslegungsbeispiel für mikrovaristorgefüllte Polymere . . . . .	35
4.3 Wunschparameter für mikrovaristorgefüllte Polymere . . . . .	48
4.4 Wunschparameter für ATO-gefüllte Polymere . . . . .	48
<b>5 Versuchsaufbauten und Messmethodik</b>	<b>51</b>
5.1 Versuchsaufbauten für die Charakterisierung von Werkstoffproben . . . . .	51
5.1.1 Versuchsstand zur Kennliniencharakterisierung . . . . .	51
5.1.2 Versuchsstand zur Charakterisierung des Langzeitverhaltens . . . . .	54
5.2 500-kV-Versuchsaufbau für Hochspannungsuntersuchungen . . . . .	60

<b>6</b>	<b>Prüflinge</b>	<b>65</b>
6.1	Herstellung von funktionell gefüllten Prüflingen auf Epoxidharzbasis .	65
6.1.1	Rezepturen . . . . .	66
6.1.2	Herstellungsverfahren . . . . .	67
6.2	Präparation der Prüfkörper . . . . .	68
6.2.1	Prüflinge zur Charakterisierung von Werkstoffproben . . . . .	68
6.2.2	Prüflinge für Hochspannungsversuche . . . . .	71
<b>7</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>73</b>
7.1	Charakterisierung von mikrovaristorgefüllten Polymeren . . . . .	73
7.1.1	Nichtlineare Leitfähigkeit von mikrovaristorgefüllten Polymeren	73
7.1.2	Mikrovaristoren für Hochfeldbeanspruchung . . . . .	75
7.1.3	Temperaturabhängigkeit der Kennlinie . . . . .	82
7.1.4	Hochspannungsversuche . . . . .	91
7.1.5	Untersuchung des Langzeitverhaltens . . . . .	99
7.1.6	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	109
7.2	Charakterisierung von ATO-gefüllten Polymeren . . . . .	110
7.2.1	Kennlinie . . . . .	110
7.2.2	Temperaturabhängigkeit der Kennlinie . . . . .	116
7.2.3	Hochspannungsversuche . . . . .	122
7.2.4	Langzeitverhalten bei Gleichspannungsbeanspruchung . . . . .	128
7.3	Zusammenfassung der Messergebnisse . . . . .	135
<b>8</b>	<b>Simulationen</b>	<b>139</b>
8.1	Darstellung des Simulationsmodells . . . . .	139
8.2	Feldstärkeabhängige Simulationen . . . . .	142
8.3	Temperatur- und feldstärkeabhängige Simulationen . . . . .	145
8.4	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse . . . . .	148
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
	<b>Eigene Publikationen</b>	<b>169</b>
	<b>Betreute Diplom-, Master-, Studien- und Bachelorarbeiten</b>	<b>171</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>173</b>
	<b>Erklärung laut § 9 PromO</b>	<b>175</b>

# Verzeichnis der Formelzeichen, Konstanten und Abkürzungen

## Liste der Formelzeichen

$\alpha$		Nichtlinearitätsexponent
$\gamma$		Feldabhängigkeitskoeffizient
$\varepsilon$	$\text{A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$	Permittivität
$\varepsilon_r$		relative Permittivität
$\vartheta$	K	absolute Temperatur
$\kappa$	$\text{S m}^{-1}$	Spezifische elektrische Leitfähigkeit
$\kappa_{\text{Gas}}$	$\text{S m}^{-1}$	Spezifische elektrische Leitfähigkeit eines Isoliergases
$\kappa_{\text{Isol}}$	$\text{S m}^{-1}$	Spezifische elektrische Leitfähigkeit eines Isolierwerkstoffes
$\kappa_V$	$\text{S m}^{-1}$	Elektrische Volumenleitfähigkeit eines Werkstoffes
$\kappa_S$	S	Elektrische Oberflächenleitfähigkeit eines Werkstoffes
$\kappa_{\text{Schicht}}$	$\text{S m}^{-1}$	Elektrische Schichtleitfähigkeit eines Werkstoffes
$\rho$	$\text{C m}^{-3}$	Volumenladungsdichte
$\sigma$	$\text{C m}^{-2}$	Oberflächenladungsdichte
$\sigma$		Standardabweichung
$\tau_e$	s	Relaxationszeitkonstante
$\Phi$	V	Elektrisches Potential
$\Phi_B$	V	Potentialbarriere (bei Halbleitern)
$A$	$\text{m}^2$	Fläche, Oberfläche
$C$	F	Elektrische Kapazität
$d$	m	Durchmesser
$d_a$	m	Außendurchmesser (Innendurchmesser der Kapselung)
$d_i$	m	Durchmesser des Innenleiters
$d_{50}$	m	Mittlerer Durchmesser der Füllstoffpartikel
$D$	$\text{A s m}^{-2}$	Elektrische Verschiebungsdichte
$E$	$\text{V m}^{-1}$	Elektrische Feldstärke
$E_b$	$\text{V m}^{-1}$	Schaltpunktfeldstärke <sup>1</sup> mikrovaristorgefüllter Polymere

<sup>1</sup>In dieser Arbeit definiert bei Erreichen einer Stromdichte  $J = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , siehe Abschnitt 4.2.

---

$E_D$	$V\,m^{-1}$	Elektrische Durchschalt-Feldstärke (bei Halbleitern)
$E_n$	$V\,m^{-1}$	Normalkomponente der elektrischen Feldstärke $E$
$E_{\max}$	$V\,m^{-1}$	Maximalwert der auftretenden elektrischen Feldstärke $E$
$E_{\tan}$	$V\,m^{-1}$	Tangentialkomponente der elektrischen Feldstärke $E$
$F$	N	Kontaktkraft
$h$	m	Höhe eines Prüfkörpers / einer geometrischen Anordnung
$H$	$A\,m^{-1}$	Magnetische Feldstärke
$I$	A	Elektrischer Strom
$J$	$A\,m^{-2}$	Elektrische Leitungsstromdichte
$J_S$	$A\,m^{-2}$	Oberflächenstromdichte
$l$	m	Abstand
$p$	$W\,m^{-3}$	Ohmsche Verlustleistungsdichte
$r$	m	Radius, radiale Position
$r_a$	m	Außenradius
$r_i$	m	Innenradius
$R$	$\Omega$	Elektrischer Widerstand
$R_{\text{entl}}$	$\Omega$	Entladewiderstand
$R_{\text{erd}}$	$\Omega$	Erdungswiderstand
$R_S$	$\Omega$	Schichtwiderstand
$s$	m	Schichtdicke
$S_{\max}$	V A	Maximale elektrische Scheinleistung
$t$	s	Zeit
$T$	s	Periodendauer
$T_a$	s	Anstiegszeit (bei transienten Vorgängen)
$T_G$	K	Glasübergangstemperatur
$U$	V	Elektrische Spannung
$U_{d50}$	V	Wert der 50-%-Durchschlagsspannung
$U_m$	V	Höchste Spannung für Betriebsmittel (Effektivwert)
$\hat{u}_{\text{Blitz}}$	V	Scheitelwert der genormten Blitzstoßspannung
$\hat{u}_{\text{Schalt}}$	V	Scheitelwert der genormten Schaltstoßspannung

## Liste der Konstanten

$\varepsilon_0$	$A\,s\,V^{-1}\,m^{-1}$	Elektrische Feldkonstante (Dielektrizitätskonstante) des Vakuums, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$
$k$		Materialabhängige Konstante

---

## Liste der Abkürzungen

AC	engl. <i>Alternating Current</i> für Wechselstrom
ATO	engl. <i>Antimony-doped Tin Oxide</i> für Antimondotiertes Zinnoxid
CNT	engl. <i>carbon nanotubes</i> für Kohlenstoff-Nanoröhrchen
DC	engl. <i>Direct Current</i> für Gleichstrom
EGS	Endenglimmschutz
EP	Epoxidharz
EQS	Elektro-Quasistatisch
FEM	Finite-Elemente-Methode
GKK	Gleichstrom-Kurzkupplung
GIS	Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlage, engl. <i>Gas Insulated Switchgear</i> ; auch: Gasisoliertes System
GIL	Gasisolierte Leitung, engl. <i>Gas Insulated Line</i>
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HTV	Hochtemperaturvernetzend
HVDC	engl. <i>High Voltage Direct Current</i>
IR	Infrarot
REM	Rasterelektronenmikroskop
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung

## Liste der chemischen Elemente und Summenformeln

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminium(III)-oxid
Bi	Bismuth (auch: Wismuth)
SiC	Siliziumcarbid
Sb	Antimon
$\text{Sb}_2\text{O}_3$	Antimon(III)-oxid
$\text{Sb}_2\text{SnO}_5$	Antimondotiertes Zinnoxid (ATO)
Sn	Zinn
$\text{SnO}$	Zinnoxid
$\text{SF}_6$	Schwefelhexafluorid
Si	Silizium
$\text{SiO}_2$	Siliziumdioxid
Ti	Titan
$\text{TiO}_2$	Titandioxid
Zn	Zink
$\text{ZnO}$	Zinkoxid
$\text{ZnSe}$	Zink-Selenid





# Abstract

Insulators for gas-insulated systems for high voltage direct current transmission (HVDC) are exposed to a field distribution different from that in alternating current systems. In particular, the accumulation of charges at the interface gas-insulator leads to considerable limitations in the dielectric strength. So far there are only a few pilot installations of direct current gas-insulated substations (DC-GIS), and the problems are handled by particularly large dimensions of the substation or by operation at reduced voltages.

In this work, the application of functional fillers into epoxy-resin material is investigated, specifically in terms of the adjustment of the electrical conductivity to optimize HVDC insulation materials. The required parameters of the functionally filled polymers are determined theoretically by field calculations using a finite element simulation program. Subsequently particles are manufactured in order to meet the required parameters. For the practical characterization of the samples, several test stands are constructed, which allow measurement of the short and long term behaviour and the temperature dependence of the electrical conductivity as well as the behaviour of insulators with product-related dimensions at high field strengths. Epoxy resin specimens, filled with specially adapted microvaristors for high field stress and particles with a nano-scaled, antimony doped tin oxide (ATO) layer are produced for the practical experiments. Thus for the first time, microvaristor-filled epoxy resin with very high switching field strengths of 6 kV/mm were available, as well as ATO-filled epoxy resin for high field applications.

The non-linear  $E$ - $J$ -characteristics of the manufactured specimens are determined by measurements, as well as their temperature dependence. By using insulators with product-related dimensions, high voltage tests are carried out with direct and impulse voltages. Furthermore, the long-term behaviour of the specimens is determined in experiments with combined thermal and electrical stress. The obtained results are verified by material characterizations based on scanning electron microscopies. The experimental results are used as input values for further FEM simulations on DC-GIS insulators.



# Kurzfassung

Isolatoren für gasisolierte Systeme für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) sind anderen Feldverhältnissen ausgesetzt als in Wechselspannungsanlagen. Insbesondere die Ansammlung von Ladungen an der Grenzfläche Gas-Isolator führt in der Praxis zu erheblichen Einschränkungen in der elektrischen Festigkeit. Bisher bestehen nur wenige Prototyp-Anlagen von gasisolierten Gleichspannungs-Schaltanlagen (DC-GIS), dort wird der Problematik der Isolatoren mit einer besonders großen Dimensionierung der Anlagen oder durch Betrieb mit reduzierter Betriebsspannung begegnet.

In dieser Arbeit wird der Einsatz von funktionellen Füllstoffen in Epoxidharz-Werkstoffen untersucht, durch welche gezielt die elektrische Leitfähigkeit eingestellt und für Anwendungen in DC-GIS optimiert werden soll. Zunächst werden die benötigten Parameter des gefüllten Isolierwerkstoffs anhand von Feldberechnungen unter Verwendung eines Finite-Elemente-Simulationsprogramms theoretisch bestimmt. Anschließend werden funktionelle Füllstoffe hergestellt, welche diese Parameter erfüllen sollen. Zur praktischen Charakterisierung der erstellten Prüflinge werden mehrere Versuchsstände aufgebaut und eingesetzt, welche die Messung des Kurz- und Langzeitverhaltens, des Temperaturverhaltens sowie des Verhaltens bei produktnahen Abmessungen unter hohen Feldstärken ermöglichen.

Zahlreiche Epoxidharz-Prüflinge, gefüllt mit speziell angepassten Mikrovaristoren für Hochfeldbeanspruchung und gefüllt mit nanoskalig antimondotiertem Zinnoxid (ATO) beschichteten Glimmer-Partikeln, werden für die praktischen Versuche eigens im Vakuum-Gussverfahren hergestellt. Somit stehen erstmals Prüflinge aus mikrovaristorgefülltem Epoxidharz mit sehr hohen Schaltpunktfeldstärken von etwa 6 kV/mm sowie Epoxidharz, gefüllt mit nanoskalig mit ATO beschichteten Partikeln, für Hochfeldanwendungen zur Verfügung.

Mittels der hergestellten Prüflinge werden die nichtlinearen  $E$ - $J$ -Kennlinien messtechnisch bestimmt und deren Temperaturabhängigkeit ermittelt. An Isolatoren mit produktnahen Abmessungen werden Hochspannungsversuche mit Gleichspannung und mit Impulsspannung durchgeführt. Weiterhin kann das Langzeitverhalten der Werkstoffproben in Versuchen mit kombinierter thermischer und elektrischer Beanspruchung ermittelt werden. Die gewonnenen Messergebnisse werden mittels Materialcharakterisierungen anhand von Rasterelektronenmikroskopien verifiziert. Außerdem werden die Ergebnisse genutzt, um als Eingangsgrößen in Simulationen das Verhalten von DC-GIS-Isolatoren mit realen Materialparametern zu berechnen.



# 1 Einleitung

Historisch gesehen hatte die Übertragung von elektrischer Energie mittels hoher Gleichspannung bereits vor der heute überwiegend etablierten Wechselspannungsübertragung erstmals stattgefunden: Die erste Hochspannungs-Fernübertragung über 57 km von Miesbach nach München wurde im Jahre 1882 mit 2 kV Gleichspannung realisiert [Dit 2011]. Allerdings setzte sich wenige Jahre später die Dreiphasen-Wechselspannungsübertragung aufgrund der einfachen Transformierbarkeit der Spannung durch. Infolge der höheren Spannung wurden die Übertragungsverluste drastisch reduziert. Die erste Fernübertragung mit Wechselspannung (15 kV, später 25 kV) im Jahre 1891 über eine Strecke von 176 km von Lauffen nach Frankfurt am Main sei als Ereignis erwähnt, welches zum Durchbruch der Wechselspannungsübertragung führte [Lau 1894].

Zunächst wurden alle Betriebsmittel als Freiluftanlagen ausgeführt, d.h. es wurde atmosphärische Luft als Isoliermedium verwendet. Ende der 1960er Jahre wurden die ersten kommerziellen gasisolierten, metallgekapselten Schaltanlagen (GIS) in der Hochspannungstechnik als platzsparende Alternative zu freiluftisolierten Anlagen in der 123-kV-Ebene angeboten [Mei 1995]. Anfang der 1970er Jahre folgte die erste GIS in der 245-kV-Ebene, wenig später wurde im Jahr 1976 die erste GIS für eine Bemessungsspannung von 420 kV in Betrieb genommen [Wal 2012]. Als Isoliergas wird aufgrund der deutlich höheren dielektrischen Festigkeit infolge der Elektronenaffinität in der Regel Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) unter hohem Druck verwendet. Die ersten gasisolierten Schaltanlagen in der 123-kV-Ebene wurden als einpolig gekapselte Anlagen in Stahlgehäusen ausgeführt. Der aktuelle Stand der Technik sind deutlich kompaktere Bauweisen in Aluminiumgehäusen<sup>1</sup>. Bis zu einer Bemessungsspannung von 170 kV werden diese mit dreipoliger Kapselung realisiert. Heute werden gasisolierte

---

<sup>1</sup>Seit Mitte der 1980er Jahre sind Aluminiumgehäuse etabliert, da diese eine hohe Korrosionsbeständigkeit, ein niedriges Gewicht sowie geringe Verluste durch Mantelströme ermöglichen und durch moderne Fertigungstechnik eine zu Stahlgehäusen identische Gasdichtigkeit erreichen.

Schaltanlagen bis in die 1100-kV-Ebene kommerziell angeboten [Hei 2009].

Bis dato werden gasisolierte Schaltanlagen in der Hochspannungstechnik nahezu ausschließlich für Wechselspannungsanwendungen vermarktet. Seit einigen Jahren wird in Europa vermehrt die Einführung einer Gleichspannungsebene zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ, engl. *HVDC*) erwogen. Weltweit sind einige HGÜ-Trassen teilweise seit mehreren Jahrzehnten in Betrieb. Erste Trassen in Europa sind bereits in Planung. Hierbei handelt es sich um Punkt-zu-Punkt-Verbindungen über lange Distanzen oder um Gleichstrom-Kurzkupplungen (GKK, engl. *back to back converter*). Gleichzeitig wächst der Bedarf an gasisolierten Anlagen und gasisolierten Leitungen für die HGÜ. Als besondere Herausforderung gilt hierbei die Entwicklung geeigneter Isolatoren für Gleichspannungs-Hochfeld-Beanspruchung, neben der Entwicklung geeigneter Schaltgeräte.

Ein wichtiger Aspekt bei Gleichspannungsbeanspruchung von Isoliersystemen ist die elektrische Feldverteilung. Direkt beim Einschalten einer Gleichspannung stellt sich zunächst eine kapazitive Feldverteilung bestimmt durch die Permittivitäten der involvierten Werkstoffe ein, analog zur Beanspruchung mit Wechselspannung. Allerdings verändert sich die anfänglich kapazitive Feldverteilung bis zum Erreichen eines stationären, resistiven Zustands der elektrischen Feldverteilung. Dieser Prozess wird in der Literatur als kapazitiv-resistiver Feldübergang bezeichnet [Mes 2002b]. Zusätzlich führen Ansammlungen von Ladungsträgern auf Isolierstoffoberflächen und im Isolierstoffvolumen zu Feldverzerrungen. Im Falle eines Polaritätswechsels einer Gleichspannungsanlage treten die höchsten Belastungen auf, und die elektrische Festigkeit wird bei Verwendung von konventionellen Isolierwerkstoffen für Wechselspannungsanlagen oft überschritten. Dies geht mit einem Durchschlag oder Überschlag des Isolators einher. Untersuchungen zu Isolatoren für gasisolierten Schaltanlagen bei Gleichspannungsbeanspruchung aus konventionellen Isolierwerkstoffen wurden unter anderem in [Man 1980], [Coo 1982], [Nak 1983], [Fuj 1989], [Tao 1993], [Mes 2002b], [Str 2012], [Rie 2013] und [Win 2014] vorgestellt.

Bisher hat sich noch kein bestimmter Werkstoff für Gleichspannungs-Isolatoren für gasisolierte Anlagen etabliert. Nanokomposite, hochresistive leitfähige Beschichtungen sowie eine definiert eingestellte Leitfähigkeit des Isolierwerkstoffs sind aktuell Gegenstand der Forschung, wobei letzteres den Fokus dieser Arbeit darstellt. Eine definierte Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit von Isolierwerkstoffen - im Falle

---

von gasisolierten Anlagen sind dies in der Regel Gießharze auf Epoxidharzbasis - kann die Eigenschaften bei Gleichspannungsbeanspruchung maßgeblich verbessern. Die elektrische Feldverteilung wird positiv beeinflusst (resistive Feldsteuerung), und die Isolierstrecke kann hierdurch deutlich besser ausgenutzt werden. Eine generelle Ansammlung von Ladungsträgern, welche bei Gleichspannung an Grenzflächen immer auftritt<sup>2</sup>, kann in der Praxis nicht vermieden werden. Jedoch kann die Ansammlung zusätzlicher Ladungen, beispielsweise infolge von Teilentladungen, auf den Isolierstoffoberflächen verringert werden, beziehungsweise diese Ladungsträger können infolge der erhöhten Leitfähigkeit rascher abfließen. Ein rascherer Abfluss der Ladungsträger wird außerdem bei Veränderungen der Feldverhältnisse begünstigt, beispielsweise im Falle eines Polaritätswechsels. Bei gasisolierten Anlagen für die HGÜ hat sich im Rahmen dieser Arbeit eine optimale spezifische elektrische Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$  im Bereich zwischen  $10^{-11}$  S/m und  $10^{-14}$  S/m herausgestellt<sup>3</sup>, je nach Auslegung der Anlage. Durch eine *feldstärkeabhängige* Nichtlinearität der elektrischen Leitfähigkeit können Feldverteilung und Störladungsabfluss noch weiter positiv beeinflusst werden [Auc 1997].

In dieser Arbeit wird der Einsatz von Füllstoffen untersucht, welche eine gezielte Einstellung der elektrischen Leitfähigkeit von Isolierwerkstoffen für Hochfeldbeanspruchung in gasisolierten Anlagen ermöglichen können. Als sehr vielversprechende Füllstoffe haben sich hierbei insbesondere Mikrovaristoren auf Zinkoxid-Basis sowie Partikel mit einer nanoskaligen Beschichtung auf Basis von antimon-dotiertem Zinnoxid (ATO) herauskristallisiert. Diese Füllstoffe wurden bis dato noch nicht für den Einsatz in Gießharz-Isolatoren für gasisolierte Anlagen untersucht. Aufgrund Ihrer Eigenschaften können diese erhebliche Vorteile im Vergleich zu den bisher etablierten Füllstoffen in Anwendungen zur Feldsteuerung ermöglichen. Eine wesentliche Eigenschaft ist das intrinsische, halbleitende Verhalten dieser beiden Füllstoffe. Hierdurch kann beim Gießharzverguss sichergestellt werden, dass die elektrischen Parameter des resultierenden Werkstoffs eine geringe Sensibilität gegenüber Schwankungen in der Füllstoffkonzentration aufweisen. Auch Agglomerationen von Füllstoffpartikeln, welche beim Einmischen in Isolierwerkstoffe auftreten können, sind hierdurch wesentlich unkritischer. Insbesondere ermöglichen die verwendeten Füllstoffe, die geforderten geringen elektrischen Leitfähigkeiten im resultierenden

---

<sup>2</sup>Im Spezialfall  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = \kappa_1/\kappa_2$  findet an der Grenzfläche zweier Medien keine Ladungsansammlung statt. Diese Bedingung ist in realen Feststoff-Gas-Isoliersystemen jedoch nicht erfüllbar.

<sup>3</sup>Die optimale Volumenleitfähigkeit wird in dieser Arbeit in Kapitel 4 im Detail erörtert.

Polymer bei hohen elektrischen Feldstärken zu realisieren. Dies stellt eine essenzielle Anforderung für gasisolierte Isoliersysteme dar. Viele in der Energietechnik bereits verwendete Füllstoffe zur Einstellung von Leitfähigkeiten – dies sind vor allem Ruß (engl. *carbon black*) oder Siliziumcarbid (SiC) – können diese Anforderung nicht erfüllen. Durch die neuen Füllstoffe, welche in dieser Arbeit charakterisiert werden, kann dies hingegen erreicht werden. Dies wird anhand von Ergebnissen zahlreicher praktischer Versuche mehrfach unter Beweis gestellt.

In Kapitel 2 werden zunächst einige theoretische Grundlagen zu Isolatoren in gasisolierten Anlagen erarbeitet, verschiedene elektrische Feldverteilungen in der Theorie diskutiert und der Effekt der Ladungsansammlung auf den Oberflächen von Isolatoren erklärt. Insbesondere werden in diesem Kapitel die bereits erwähnten funktionellen Füllstoffe vorgestellt, welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit umfangreich charakterisiert werden. Dies sind zum einen Mikrovaristoren auf ZnO-Basis und zum anderen Glimmerpartikel, welche mit einer halbleitenden, nanoskaligen Schicht aus antimondotiertem Zinnoxid (ATO) beschichtet sind. Nachdem in Kapitel 3 die Ziele dieser Arbeit herausgearbeitet werden, erfolgt in Kapitel 4 die theoretische Auslegung geeigneter Isolierwerkstoffe und insbesondere die Festlegung der gewünschten Parameter des Isolierwerkstoffs. Anschließend widmet sich Kapitel 5 den Versuchsaufbauten, welche für praktische Untersuchungen erstellt und eingesetzt werden, und mittels derer die Eigenschaften der neu entwickelten, funktionell gefüllten Werkstoffe gezielt ermittelt werden. Die hierfür hergestellten Prüflinge sind in Kapitel 6 im Detail erläutert. Zahlreiche Ergebnisse der praktischen Versuche werden in Kapitel 7 vorgestellt und diskutiert. Zu Beginn richtete sich der Fokus der Untersuchungen auf die von der elektrischen Feldstärke abhängige elektrische Kennlinie der Werkstoffe und deren Abhängigkeit von der Temperatur. In weiteren Schritten sind sowohl das Langzeitverhalten bei kombinierter thermischer und elektrischer Beanspruchung sowie das Verhalten bei produktnahen Abmessungen unter SF<sub>6</sub> in einem gasisolierten Hochspannungs-Versuchsaufbau untersucht worden. Anhand der Hochspannungsversuche wird die Einsetzbarkeit gefüllter Isoliersysteme bei Hochfeldbeanspruchung unter Beweis gestellt. Mittels Feldsimulationen werden schließlich in Kapitel 8 die Vorteile der funktionell gefüllten Werkstoffe theoretisch beleuchtet, wobei als Eingangsgröße Messdaten aus den praktischen Versuchen verwendet werden. Abschließend sind in Kapitel 9 die erzielten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.



## **2 Theoretische Grundlagen und Stand des Wissens**

Für die Auswahl und Charakterisierung geeigneter Werkstoffe für Isolatoren zur Anwendung in gasisolierten Systemen für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung müssen zunächst einige theoretische Aspekte erarbeitet werden. Neben dem typischen Aufbau diverser Isolatoren befasst sich dieses Kapitel mit der elektrischen Feldverteilung, insbesondere bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung, sowie dem bei Gleichspannung sehr wichtigen Aspekt der Ansammlung von Ladungsträgern, vorwiegend auf den Oberflächen der Isolatoren. Anschließend werden verschiedene Füllstoffe charakterisiert, welche durch die Einmischung in Epoxidharz-Werkstoffe eine gezielte Leitfähigkeit des resultierenden Verbundwerkstoffs bewirken können. Das Einstellen einer geringen, definierten elektrischen Leitfähigkeit begünstigt zum einen einen raschen Abfluss von Oberflächenladungen und zum anderen eine resistive Steuerung der elektrischen Feldverteilung. Beides ermöglicht eine bessere Ausnutzung des Isolierwerkstoffs.

### **2.1 Einführung zu Isolatoren in gasisolierten Anlagen**

Seit mehr als 40 Jahren werden gasisolierte Hochspannungs-Schaltanlagen für Wechselspannung kommerziell vertrieben und eingesetzt. Durch den Einsatz von Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) mit einer deutlich höheren elektrischen Festigkeit (im Vergleich zu atmosphärischer Luft etwa Faktor 10 bei um 3 bis 5 bar erhöhten Gasdrücken) wird eine drastische Reduzierung des Flächen- und Volumenbedarfs erzielt [Küc 2009]. Sämtliche Komponenten dieser Anlagen müssen auf die gesamte Lebensdauer der Anlage, welche in der Energietechnik üblicherweise 40 Jahre und länger beträgt, ausgelegt werden. In zahlreichen Baugruppen und Abschnitten von gasisolierten

Anlagen müssen Isolatoren eingesetzt werden. Diese werden in der Regel aus duroplastischen Kunststoffen auf Epoxidharzbasis gefertigt. Die Aufgabe der Isolatoren ist überwiegend die elektrische Isolation zwischen dem stromführenden Leiter auf Hochspannungspotential und der Kapselung auf Erdpotential. Eine mechanische Befestigung des Innenleiters oder der Innenleiter an einer bestimmten Position und die hierdurch auftretenden mechanischen Kräfte sind außerdem für die Auslegung essenziell. Üblicherweise werden anorganische Füllstoffe, unter anderem Silizium oder Aluminiumoxid, in das Epoxidharz eingemischt, um die technischen Eigenschaften wie den Volumenschwund des Systems während der Aushärtephase oder das Brennbarkeitsverhalten positiv zu beeinflussen [Bey 1983]. Diese Füllstoffe erhöhen zudem die mechanische Festigkeit [Koc 2012]. Aufgrund der Zersetzungsprodukte von  $\text{SF}_6$  in Kombination mit Feuchtigkeit wird im Falle von  $\text{SF}_6$ -isolierten Anwendungen Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) als Füllstoff verwendet [Bey 1992]. Weiterhin werden gasisolierte Anlagen mit Isoliergasen, vorwiegend Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ), bei Überdruck betrieben. Gasdichte Schottisolatoren haben daher die Aufgabe, einzelne Gasräume gegeneinander dicht abzuschotten. Hierdurch können Auswirkungen eines Störfalls auf andere Baugruppen oder Erweiterungen der Anlage auf ein Minimum beschränkt werden [ABB 1999]. Die Abschottung führt zu besonders hohen mechanischen Anforderungen an diese Isolatoren. Üblicherweise besteht die Forderung eines Berstdruckes in der Größenordnung von 30 bar [Bey 1983].

## 2.2 Aufbau von Isolatoren in gasisolierten Anlagen

In gasisolierten metallgekapselten Anlagen sind verschiedene Grundgeometrien für Isolatoren auf Gießharzbasis etabliert. Generell unterscheidet man hierbei zwischen Schottisolatoren und gasdurchlässigen Scheibenisolatoren. Ein Schottisolator hat zusätzlich die Aufgabe, verschiedene funktionelle Abschnitte einer Anlage in getrennte Gasräume zu unterteilen. Gasdurchlässige Isolatoren dienen lediglich der Abstützung der Innenleiter und stellen daher im Regelfall geringere mechanische Anforderungen an den Werkstoff.

### 2.2.1 Bauformen von Isolatoren für gasisierte Anlagen

Aufgrund der Forderung einer Abschottung zweier benachbarter Gasräume muss bei diesem Isolatorentyp ein Kompromiss bei der Formgebung eingegangen werden: Aus dielektrischen Gründen sollte die Wandstärke so dünn wie möglich sein, aus mechanischen Gründen allerdings möglichst dick [Bey 1983].

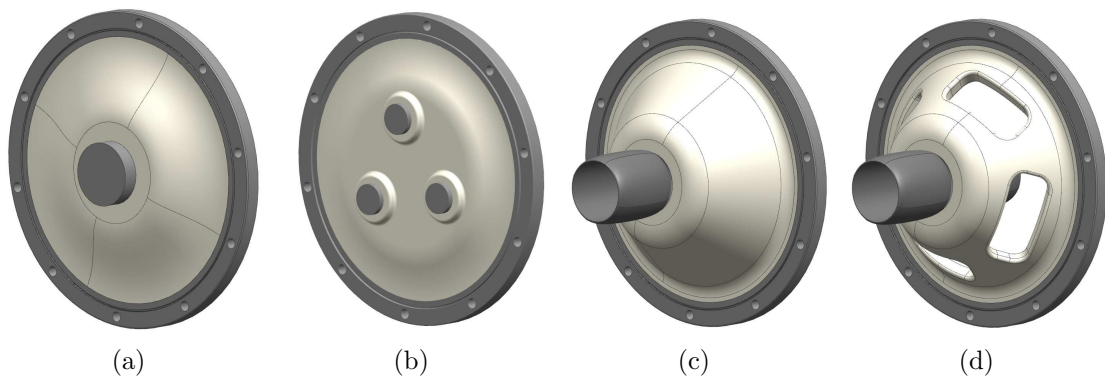


Abbildung 2.1: Prinzipskizzen häufig verwendeter Bauformen von Isolatoren in gasisolierten Anlagen: (a) Scheibenisolator einphasig, (b) Scheibenisolator dreiphasig, (c) Trichterisolator einphasig gasdicht und (d) Trichterisolator einphasig gasdurchlässig.

In der Literatur und in praktischen Ausführungen werden verschiedene Formgebungen vorgeschlagen bzw. eingesetzt: Der Scheibenisolator (Abbildung 2.1 (a)) erreicht durch seine spezielle Formgebung an der Schräggrenzfläche in Kombination mit der Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  des Gießharzformstoffes eine nahezu konstante Tangentialfeldstärke entlang der Oberfläche des Isolators (vgl. Abbildung 2.2 (b)). Der Durchschlagweg im Feststoff und der Überschlagweg sind bei dieser Formgebung allerdings minimal [Mos 1979]. Durch einen langen Kriechweg wird hingegen bei trichterförmigen Schottisolatoren (Abbildung 2.1 (c)) eine niedrige Tangentialfeldstärke erreicht (vgl. Abbildung 2.2 (a)) und gleichzeitig eine besonders kompakte Anordnung innerhalb der Anlage erzielt [Bey 1992]. Im Falle von dreiphasig gekapselten gasisolierten Anlagen werden außerdem Scheibenisolatoren mit einer Drehstromdurchführung für drei Leiter verwendet (Abbildung 2.1 (b)). Auch bei Isolatoren für gasisierte Anlagen waren vor allem bei den ersten kommerziellen Anlagen Rippen zur Verlängerung des Kriechwegs üblich, da auf keiner Baustelle Schmutz- und Staubfreiheit sichergestellt werden kann [Bey 1983]. Zur Vermeidung der Anlagerung von Partikeln auf der Isolatoroberfläche sollten horizontal angeordnete Isolatoren in gasisolierten Anlagen vermieden werden

bzw. horizontale Isolatoren hinsichtlich abgelagerter Partikel regelmäßig untersucht werden [Neu 2012]. Bei Gleichspannungsbeanspruchung wurde in praktischen Versuchen nachgewiesen, dass leitfähige Partikel im Gasraum immer zur negativeren Elektrode wandern, im Falle einer negativen Polarität am Innenleiter sich also an dessen Oberfläche ansammeln und Teilentladungen verursachen [Ber 2013].

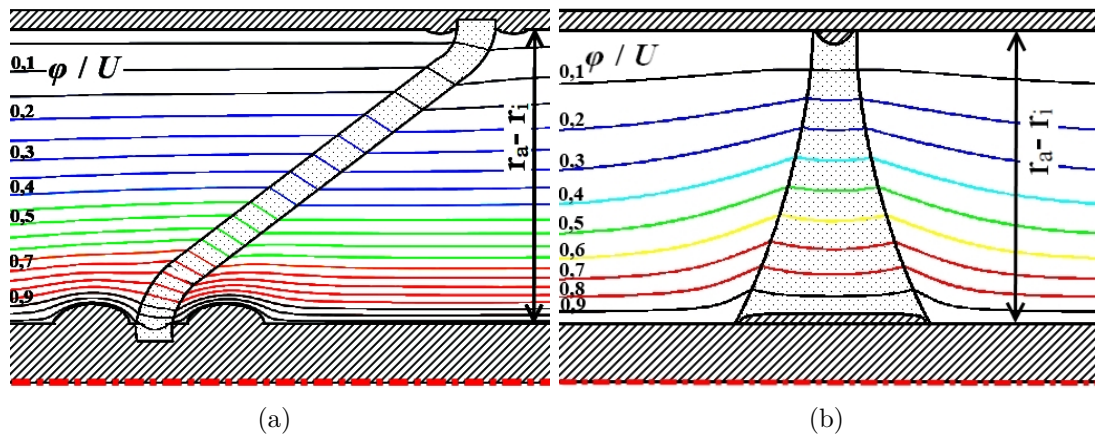


Abbildung 2.2: Häufig verwendete Bauformen von Schottisolatoren in gasisolierten Anlagen. Dargestellt ist der Verlauf der Äquipotentiallinien  $\varphi/U$  eines Trichterisolators (a) sowie eines Scheibenisolators mit speziell geformter Schräggrenzfläche (b), Skizzen frei nach [Mos 1979].

Überall dort, wo keine Gasräume voneinander abgeschottet werden müssen, können gasdurchlässige Scheibenisolatoren verwendet werden (Abbildung 2.1 (d)) und hierdurch mechanische Beanspruchungen auf diese infolge von unterschiedlichen Gasdrücken eliminiert werden.

## 2.2.2 Stütz-Isolatoren

Speziell in gasisolierten Leitungen (GIL) werden auch zylindrische Isolatoren zur Abstützung des Innenleiters verwendet. Diese sind in einem Abstand in der Größenordnung von 10 m fest in den Innenleiter eingeschraubt, jedoch an der Kapselung gleitend gelagert, um bei der Montage das Einschieben des Innenleiters in das Kapselungsrohr der GIL zu ermöglichen (vgl. (5) in Abbildung 2.3 (a) sowie Abbildung 2.3 (b) und Abbildung 2.4). Im Falle von vertikal verlaufenden Abschnitten werden drei Stützisolatoren verwendet, um eine korrekte Positionierung des Innenleiters zu gewährleisten [Koc 2012].

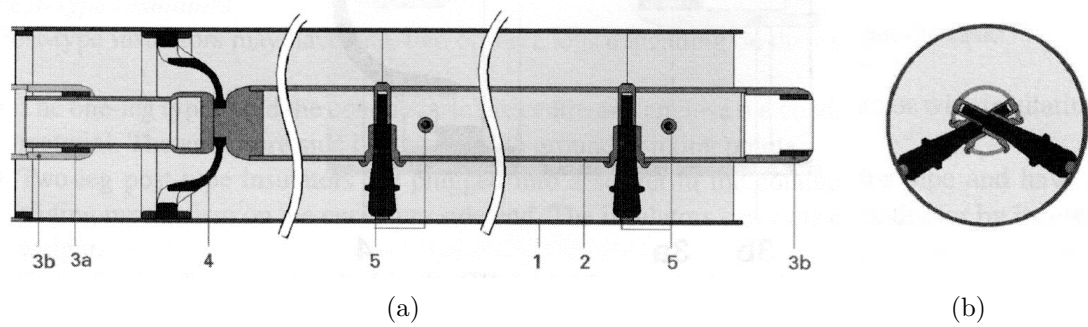


Abbildung 2.3: Isolatoren in gasisolierten Leitungen: (a) Schnittdarstellung einer gasisolierten Leitung (GIL) mit Schott- und Stützisolatoren; (b) Blick in axialer Richtung auf die Anordnung von zwei GIL-Stützisolatoren. Bildquellen: [Koc 2012], ©2012 Wiley-IEEE Press.

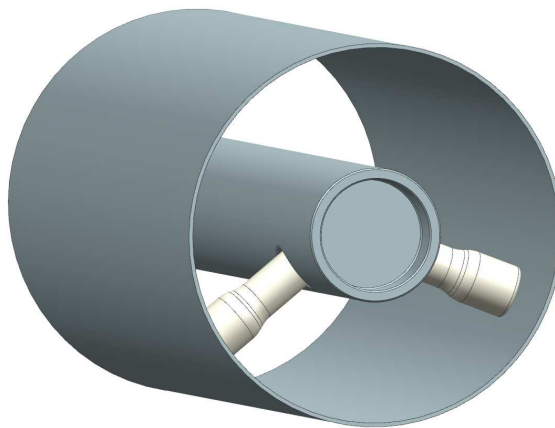


Abbildung 2.4: Prinzipskizze der Abstützung des Leiters in gasisolierten Leitungen (GIL) mittels zweier am Leiter befestigter Stützisolatoren, welche außen am Kapselungsrohr gleitend gelagert sind. Skizze frei nach [Koc 2012]

## 2.3 Elektrische Feldverteilung an Isolatoren

Aus dem Durchflutungsgesetz nach Maxwell gemäß Gleichung 2.1 geht hervor, dass der elektrische Strom aus einer Leitungsstromdichte  $\vec{J}$  und/oder einer Verschiebungsstromdichte  $\partial\vec{D}/\partial t$  gebildet wird [Küp 1984].

$$\oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_A \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{A} \quad (2.1)$$

Die Leitungsstromdichte  $\vec{J}$  eines Werkstoffes wird bei gegebener Feldstärke  $\vec{E}$  gemäß Gleichung 2.2 durch die elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  bestimmt, wohingegen sich die Verschiebungsdichte  $\vec{D}$  gemäß Gleichung 2.3 durch die Permittivität  $\varepsilon$  einstellt.

$$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{E} \quad (2.2)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} \quad (2.3)$$

Bei gut leitfähigen Werkstoffen dominiert in der Regel der Anteil der Leitungsstromdichte  $\vec{J}$  gemäß Gleichung 2.2. Zur Ermittlung des dominierenden Mechanismus der elektrischen Feldverteilung (Leitungsstrom oder Verschiebungsstrom) ist eine Betrachtung der Relaxationszeitkonstanten  $\tau_e$  gemäß Gleichung 2.4 im Vergleich zu einer Viertelperiode  $T/4$  der elektrischen Feldveränderung für periodische Signale mit der Periodendauer  $T$  bzw. der Anstiegszeit  $T_a$  für transiente Größen heranzuziehen [Küc 2009].

$$\tau_e = R \cdot C = \frac{\varepsilon}{\kappa} \quad (2.4)$$

Wenn  $T/4 \leq \tau_e$  bzw.  $T_a \leq \tau_e$  erfüllt ist, dominiert der dielektrische Verschiebungsstrom, für den umgekehrten Fall ( $T/4 \geq \tau_e$  bzw.  $T_a \geq \tau_e$ ) hingegen der Leitungsstrom. Wenn die Änderungszeit der Felder sehr gering ist ( $T/4 \gg \tau_e$  bzw.  $T_a \gg \tau_e$ ), spricht man von einem stationären Strömungsfeld [Küc 2009].

Bei gängigen Isolierwerkstoffen überwiegt bei Wechsel- und Stoßspannungsbeanspruchung aufgrund der geringen elektrischen Leitfähigkeit der verwendeten Werkstoffe

und der kurzen Zeitdauer  $T/4$  die Verschiebungsstromdichte  $\vec{D}$  gegenüber der Leitungsstromdichte  $\vec{J}$ , wie in Gleichung 2.5 dargestellt wird.

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \gg \vec{J} = \kappa \cdot \vec{E} \quad (2.5)$$

Betrachtet man einen Isolierwerkstoff in einer Gleichfeldanordnung im stationären Zustand, d.h. nach Abschluss des Übergangs von der kapazitiven zur resistiven Feldverteilung, so ist die Zeitdauer der Feldänderung als gegen unendlich gehend zu betrachten. Demzufolge ist die elektrische Feldverteilung im stationären Zustand einzig durch die Leitungsstromdichte gemäß Gleichung 2.2 bestimmt, welche ausschließlich von der elektrischen Leitfähigkeit des Werkstoffes abhängt. Grenzen in einer Isolieranordnung Werkstoffe mit stark unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeiten aneinander, hat dies zur Folge, dass fast ausschließlich der Werkstoff mit der niedrigeren Leitfähigkeit durch das elektrische Feld beansprucht wird [Hin 2011]. Die Permittivität  $\varepsilon$  der Werkstoffe hat im stationären Zustand keinerlei Einfluss auf die Feldverhältnisse.

Beim Einschalten einer Gleichspannung oder nach Polaritätswechseln und anderen kurzzeitigen Änderungen der Amplitude ( $T/4 \ll \tau_e$  oder  $T_a \ll \tau_e$ ) überlagert sich dem Strömungsfeld ein dielektrisches Verschiebungsfeld gemäß den kapazitiven Verhältnissen der Isolieranordnung, analog zur Wechselspannungsbeanspruchung. Daher werden Isoliersysteme für Gleichspannungsanwendungen bei transienten Vorgängen immer einer Mischfeldbeanspruchung ausgesetzt. Das überlagerte, kapazitive Feld klingt im weiteren zeitlichen Verlauf ab, bis der stationäre Endzustand erreicht ist [Bär 2010]. Die Dauer des Abklingvorganges wird mit der Zeitkonstanten  $\tau_e$  gemäß Gleichung 2.4 beschrieben und kann bei geringen Leitfähigkeiten  $\kappa$  der involvierten Werkstoffe bis hin zu Wochen oder Monaten betragen [Küc 2009]. Mit der Feldtransition geht eine Ansammlung von Ladungsträgern im Volumen der Werkstoffe oder auf deren Oberflächen einher, welche ebenfalls die Feldverteilung beeinflusst. Des Weiteren ist die Leitfähigkeit sehr sensibel gegenüber äußeren Einflüssen und Umgebungsbedingungen. Bei Isolierwerkstoffen sind insbesondere die Parameter Temperatur, Feuchtigkeit und elektrische Feldstärke maßgeblich [Cig 2012b], [Kre 1995]. Hierdurch können sich bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen einer Anlage, beispielsweise niedrigeren Temperaturen im Bereich des Innenleiters im Falle einer geringen Auslastung der Anlage, vollkommen unterschiedliche Feldverhältnisse ergeben. Speziell bei

Epoxidharzformstoffen konnte in Experimenten eine starke Abhängigkeit des Durchgangswiderstands vom Feuchtegehalt nachgewiesen werden [Lut 2011]. Außerdem können Alterungsmechanismen zu Änderungen der Eigenschaften des Werkstoffes führen [Kah 1989].

## 2.4 Ladungsträgerakkumulation

An der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Werkstoffen, hier Isoliergas und Isolierwerkstoff, ist die Normalkomponente der elektrischen Verschiebungsdichte nur dann stetig, wenn der Quotient der elektrischen Leitfähigkeiten  $\kappa$  der beiden angrenzenden Medien mit dem Quotienten der Permittivitäten  $\varepsilon$  identisch ist (Gleichung 2.6).

$$\frac{\kappa_{\text{Gas}}}{\kappa_{\text{Isol}}} = \frac{\varepsilon_{\text{Gas}}}{\varepsilon_{\text{Isol}}} = \frac{\varepsilon_{\text{r, Gas}}}{\varepsilon_{\text{r, Isol}}} \quad (2.6)$$

Im Regelfall ist Gleichung 2.6 nicht erfüllt, die Quotienten unterscheiden sich oft sogar um viele Größenordnungen, da die Leitfähigkeiten um mehrere Dekaden variieren können, die Permittivitäten aber in den meisten Fällen höchstens um den Faktor 10 variieren. In der Konsequenz findet eine Ansammlung von Ladungsträgern an der Grenzfläche statt.

Bei einem Isolator mit vernachlässigbar geringer Oberflächen- und Volumenleitfähigkeit akkumulieren so lange Ladungsträger aus dem Gasraum an der Oberfläche des Isolators, bis die Ladungsansammlung ein Feld in entgegengesetzter Richtung zur Normalkomponente  $\vec{D}_{\text{n, Gas}}$  mit identischem Betrag zu  $\vec{D}_{\text{n, Gas}}$  erzeugt. Die hiermit verbundene, stationäre Oberflächenladungsdichte  $\sigma_{\text{stat}}$  kann gemäß Gleichung 2.7 ausgedrückt werden und hängt betragsmäßig von den Verschiebungsdichteverhältnissen  $\vec{D}_{\text{n, Gas}}$  und  $\vec{D}_{\text{n, Isol}}$  an der Grenzfläche im ungeladenen Zustand ab [Cla 2008], [Tao 1993]. Je nach Geometrie treffen mehr oder weniger Feldlinien auf der Oberfläche eines ungeladenen Isolators auf (vgl. Abbildung 2.5 (a)). Sobald die maximale Ladungsträgerdichte erreicht wurde, gilt hier  $\vec{D}_{\text{n}} = 0$ , d.h. es treffen keine Feldlinien mehr an der Oberfläche des Isolierwerkstoffes auf [Man 1980], [Fuj 1989], [Mes 2002b], siehe Abbildung 2.5 (c), und es wird ein stetiger Zustand erreicht, der stationäre Zustand des elektrischen Strömungsfeldes [Tao 1993].



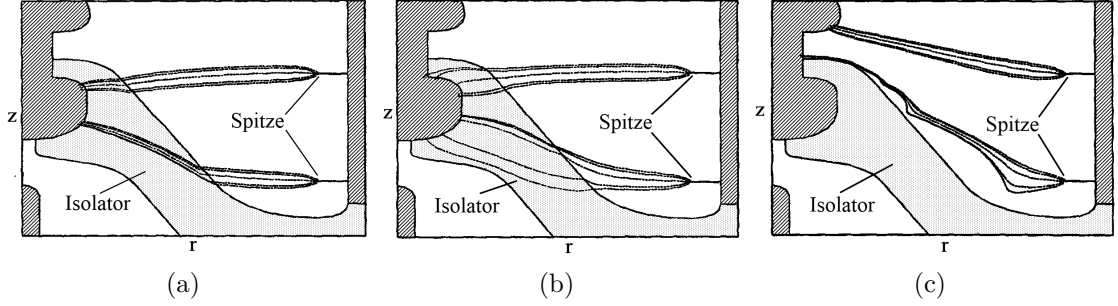


Abbildung 2.5: Simulationsergebnis der Oberflächenladungsansammlung an einem Trichterisolator in 2D-axialsymmetrischer Darstellung, mit eingebauten Störstellen in Form von zwei Spitzen an der Kapselung. (a) Initialer Feldlinienverlauf direkt nach dem Einschalten einer Gleichspannung; (b) Feldlinienverlauf nach 52 Stunden; (c) Feldlinienverlauf nach vollständigem Aufladen, es treffen keine Feldlinien mehr auf der Isolatoroberfläche auf. Bild nach [Mes 2002a], ©2002, IEEE.

Die Akkumulation von Ladungsträgern an der Oberfläche sowie deren Verteilung hängt im Spezialfall gemäß Gleichung 2.7 mit der gasseitigen Normalkomponente des elektrischen Feldes  $\vec{D}_n$  zusammen.

$$\vec{D}_{n,\text{Gas}} - \vec{D}_{n,\text{Isol}} = \sigma_{\text{stat}} \quad (2.7)$$

Bei einem Isolator mit nicht vernachlässigbarer Oberflächenleitfähigkeit  $\kappa_S$  muss Gleichung 2.7 entsprechend erweitert werden. Hieraus folgt Gleichung 2.8 [Lut 2011], [Win 2012]:

$$\vec{J}_{n,\text{Isol}} - \vec{J}_{n,\text{Gas}} - \text{div}(\kappa_S \cdot E_{\text{tan}}) = \frac{\partial \sigma}{\partial t} = J_S \quad (2.8)$$

Die zeitliche Ableitung der Ladungsdichte auf der rechten Seite von Gleichung 2.8 stellt hierbei die Stromdichte  $J_S$  entlang der Isolatoroberfläche dar. Je nach Vorzeichen der Tangentialfeldstärke  $E_{\text{tan}}$  erfolgt eine Ansammlung von positiven oder negativen Ladungen [Nak 1983]. Bei einer dominierenden Oberflächenleitfähigkeit des Isolators (Gleichung 2.8) korreliert die Oberflächenladungsverteilung mit der tangentialen Feldstärke der Grenzfläche [Win 2014].

Bei Feststoff-Gas-Isoliersystemen können die Ladungsträger durch das Isolierstoffvolumen, die Isolierstoffoberfläche oder durch das Isoliergas an die Grenzfläche

gelangen, wobei im Falle von sehr schwach leitfähigen Epoxidharz-Isolierwerkstoffen der Ladungsträgertransport im Isoliergas dominiert [Tao 1993], [Mes 2002b]. Je nach Anordnung überwiegt ab einer bestimmten Oberflächenleitfähigkeit des Isolators der Transport über den Isolator [Win 2012]. In früheren Untersuchungen wurde festgestellt, dass Feldemission, insbesondere ausgehend von Elektroden mit negativer Polarität, ebenfalls einen entscheidenden Beitrag zur Aufladung von Oberflächen leisten kann [Nak 1983]. Ein Zusammenhang zwischen aktivem Gasvolumen und Oberflächenaufladung konnte in [Sch 2013] nachgewiesen werden. Ein Einfluss der Aufladung und der resistiven Feldverteilung von der Ionenpaar-Generationsrate des Isoliergases wurde anhand von Berechnungen aufgezeigt [Win 2012]. Die Ansammlung der Ladungsträger geht mit dem Übergang von der kapazitiven Feldverteilung zur stationären, resistiven Feldverteilung einher. Aufgrund der üblicherweise sehr geringen elektrischen Leitfähigkeiten kann die Zeitdauer bis zum Erreichen des vollständig geladenen Zustandes einige Wochen betragen [Mes 2002b]. Sowohl die Ladungsträgerverteilung als auch die Dauer des Übergangs von der kapazitiven zur resistiven Feldverteilung hängen von Volumen- und Oberflächenleitfähigkeit des Isolators und der Volumenleitfähigkeit des Isoliergases ab.

Die Aufladung von Isolatoroberflächen führt wiederum zu einer Überlagerung aus angelegtem, äußeren Feld und einem Feld infolge der Ladungsträger. Diese Veränderung der Feldverhältnisse kann die dielektrische Festigkeit der Anordnung unter Umständen drastisch reduzieren und einen elektrischen Durchschlag oder Überschlag initiieren [Man 1980], [Coo 1982], [Vol 2004]. Die Reduktion der elektrischen Festigkeit liegt in einer Feldverzerrung und in einer Erhöhung der Maximalfeldstärke entlang der Isolatoroberfläche begründet. Als besonders kritische Fälle sind ladungsbedingte Felderhöhungen bei Polaritätswechseln [Nak 1983] und bei Impulsspannungen mit umgekehrter Polarität zu benennen [Fuj 1989]. Als Mechanismen für den Abbau vorhandener Störladungen<sup>1</sup> auf Oberflächen werden in der Literatur der Abbau durch das Isolierstoffvolumen, der Abbau über die Isolierstoffoberfläche sowie die Neutralisation durch Ionen aus dem Gasraum genannt. Welcher dieser Mechanismen den Ladungsabbau dominiert, ist von den Werkstoffeigenschaften und Umgebungsbedingungen abhängig [Led 2009]. Epoxidharz und auch andere Isolierwerkstoffe weisen, wie bereits erwähnt, eine Feldstärkeabhängigkeit und eine Temperaturabhän-

---

<sup>1</sup>In dieser Arbeit werden zusätzliche Ladungen, welche nicht aufgrund der stationären Feldbedingung an der Grenzfläche akkumulieren, sondern z.B. in Folge von Teilentladungen zusätzlich auftreten, mit dem Begriff *Störladungen* bezeichnet.

gigkeit der elektrischen Leitfähigkeit auf, welche gemäß der empirischen Gleichung 2.9 formuliert werden kann, wobei  $\alpha$  den Temperaturkoeffizienten,  $\gamma$  den Feldabhängigkeitskoeffizienten und  $\kappa_0$  die Gleichstromleitfähigkeit bei einer Temperatur  $\vartheta_0 = 273 \text{ K}$  und einer elektrischen Feldstärke  $\vec{E} = 0$  beschreiben [Cig 2012b].

$$\kappa(\vec{E}, \vartheta) = \kappa_0 \cdot \exp(\alpha\vartheta + \gamma\vec{E}) \quad (2.9)$$

Neben der Ladungsansammlung auf Oberflächen infolge der Grenzfläche zwischen zwei Werkstoffen tritt aufgrund der vorherrschenden Feld- und Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit insbesondere bei Isolieranordnungen mit inhomogener Temperatur- und Feldverteilung eine Ansammlung von Volumenladungen im Isolierwerkstoff auf [Man 1980], [Str 2012]. Dies kann auf Basis der Kontinuitätsgleichung nach Maxwell [Küp 1984] gemäß der Herleitung des Gleichungssystems 2.10 mathematisch dargestellt werden, wobei  $\vec{J}$  die Stromdichte,  $\vec{E}$  die elektrische Feldstärke,  $\kappa$  die elektrische Leitfähigkeit,  $\varepsilon$  die Dielektrizitätszahl des Werkstoffs und  $\rho$  die Volumenladungsdichte beschreiben.

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{J} &= 0 \\ \operatorname{div}(\kappa \vec{E}) &= 0 \\ \kappa \cdot \operatorname{div}(\vec{E}) + \vec{E} \cdot \operatorname{grad}(\kappa) &= 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \kappa \cdot \left(\frac{\rho}{\varepsilon}\right) + \vec{E} \cdot \operatorname{grad}(\kappa) &= 0 \\ \rho &= -\varepsilon \vec{E} \cdot \frac{\operatorname{grad}(\kappa)}{\kappa} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Nach Auflösung des Gleichungssystems 2.10 zur Volumenladungsdichte  $\rho$  ergibt sich Gleichung 2.11. Nur im Falle einer homogenen Leitfähigkeit des Werkstoffes entlang der elektrischen Feldlinien sowie einer konstanten Temperatur würde Gleichung 2.11 zu Null werden. Vorhandene Volumenladungen verursachen Feldverzerrungen im Isolierstoffvolumen; dies begünstigt wiederum weitere Ladungsansammlungen an der Oberfläche [Str 2012].

In der Literatur wird eine für Gleichspannung optimierte Geometrie eines Stützisolators, welche in der Kontur den Feldlinien ohne Isolierwerkstoff nachempfunden

wird, vorgeschlagen [Fuj 1989]. Hierdurch kann die Normalkomponente des elektrischen Feldes  $\vec{E}_n = 0$  an der Oberfläche drastisch reduziert werden, und es entsteht nur eine vergleichsweise geringe Aufladung. Allerdings ist dabei vor allem die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit nicht berücksichtigt. Außerdem sind derartige Geometrien in vielen Anwendungen nicht praktikabel, da aus mechanischen Gründen konische Isolatoren angestrebt werden. Gegen stark konische Isolatoren spricht, dass diese die höchste Ansammlung von Oberflächenladungen an deren konkaven Oberfläche aufweisen [Cig 2012a]. In der DC-Überschlagsspannung wurden in Untersuchungen an scheibenförmigen und konischen Isolatoren keine nennenswerten Unterschiede festgestellt. Versuche mit Vorbelastung durch negative Gleichspannung und anschließender Schaltstoßspannungsprüfung mit positiver Polarität zeigten allerdings, dass Isolatoren mit besonders langem Konus die stärkste Reduzierung der Schaltstoß-Überschlagsspannungswerte von etwa 25 % gegenüber dem nicht DC-vorbelasteten Konus-Isolator aufweisen. Ursache hierfür ist die höhere Oberflächenaufladung dieser Geometrie infolge der Vorbeanspruchung [Cig 2012a].

## 2.5 Füllstoffe

Eine gezielte Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit von Gießharz-Isolierwerkstoffen kann insbesondere durch das Einmischen geeigneter Füllstoffe erreicht werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden geringe, möglichst stabile und gut reproduzierbare elektrische Leitfähigkeiten angestrebt. In diesem Abschnitt werden zuerst Füllstoffe aufgezeigt, welche bereits für Anwendungen zur Feldsteuerung etabliert sind (Ruß und Siliziumkarbid (SiC)), und die Problematik der Erzeugung sehr geringer, definierter Leitfähigkeiten mit diesen Füllstoffen dargestellt. Anschließend werden neue Füllstoffe charakterisiert, welche zur Verbesserung der Gleichspannungseigenschaften für Isolatoren in gasisolierten Anlagen unter Hochfeldbeanspruchung ausgewählt wurden: Mikrovaristoren auf ZnO-Basis (seit dem Jahr 2000 verfügbar) sowie Glimmerpartikel, die nanoskalig mit antimondotiertem Zinnoxid (ATO) beschichtet wurden (erst seit wenigen Jahren für die geforderten geringen Leitfähigkeiten verfügbar). Die Auswahlkriterien für diese Füllstoffe, welche bisher noch nie als Füllstoffe in Isolierwerkstoffen für Hochfeld-Gleichspannungs-Isolatoren für gasisolierte Anlagen eingesetzt wurden, werden im Detail erläutert.

### 2.5.1 Erhöhung der Leitfähigkeit polymerer Isolierwerkstoffe

In Anwendungen, in welchen eine gewisse elektrische Leitfähigkeit aus Gründen der Feldsteuerung gefordert wird, werden zur gezielten Erhöhung der Leitfähigkeit in polymeren Isolierwerkstoffen meist Füllstoffe beigemischt. In den Feldsteuerelementen von Hochspannungs-Kabelgarnituren wird hierfür vor allem technischer Ruß (engl. carbon black) als Füllstoff eingesetzt. Die Rußpartikel als solches weisen eine relativ hohe elektrische Leitfähigkeit auf. Die elektrische Leitfähigkeit des resultierenden Polymers wird beim Einmischen vor allem von der Packungsdichte der Partikel und der damit verbundenen Anzahl der Berührstellen der einzelnen Partikel bestimmt. Sobald diese ausreichend hoch ist und sich durchgängige, leitfähige Ketten aus Füllstoffpartikeln im Polymer bilden, spricht man von Perkolation. Die Perkulationskurve von rußgefüllten Polymeren (gestrichelter Verlauf in Abbildung 2.6) zeigt hierbei ab einer bestimmten Füllstoffmenge einen steilen Abfall des elektrischen Widerstands. Der hochohmige, flache Bereich der Perkulationskurve (links) wird als unterperkolativ bezeichnet, der niederohmige Bereich rechts als überperkolativ. Kohlenstoff-Nanoröhrchen weisen ebenfalls einen steilen Verlauf der Perkulationskurve auf, welcher jedoch bei deutlich geringeren Füllgraden vorzufinden ist (vgl. durchgezogener Verlauf in Abbildung 2.6).

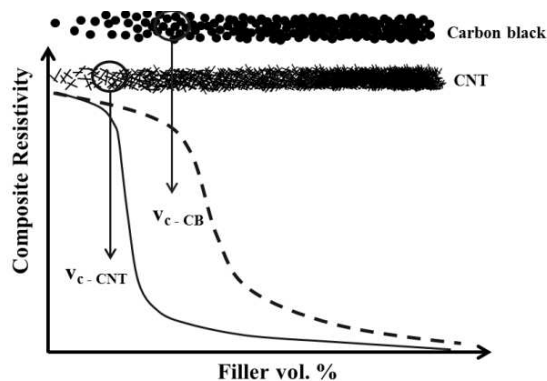


Abbildung 2.6: Perkulationskurven von Rußpartikeln (carbon black) und Kohlenstoff-Nanoröhrchen (carbon nanotubes (CNT)). ©2011 Hwang, Park, Yoon, Bang, Veröffentlicht in [Hwa 2011] unter CC BY-NC-SA 3.0 Lizenz. Online abrufbar unter: <http://dx.doi.org/10.5772/17374>

Durch die hohe Steilheit der Perkulationskurve gestaltet sich das gezielte Einstellen einer Leitfähigkeit im Bereich der Perkolationsschwelle in der Praxis als besonders schwierig, da bereits geringe Schwankungen oder Inhomogenitäten beim Einmischen

der Partikel sich in einer gravierenden Veränderung der Leitfähigkeit auswirken können. Bei Anwendungen, in denen rußgefüllte Polymere eingesetzt werden (z.B. geometrische Feldsteuerung in Kabelgarnituren), besteht meist eine Forderung nach vergleichsweise hohen elektrischen Leitfähigkeiten. Für die Einmischung in Isoliersysteme mit der Forderung nach geringen, gut definierten elektrischen Leitfähigkeiten sind rußgefüllte Systeme jedoch ungeeignet.

Ein weiterer Füllstoff, welcher im Endenglimmschutz bei Isoliersystemen von rotierenden Hochspannungsmaschinen in Lacken oder Bändern eingesetzt wird, ist Siliziumkarbid (SiC). Dieser Füllstoff ermöglicht aufgrund einer Potentialbarriere, welche sich an der Grenze zwischen den Partikeln ausbildet, eine nichtlineare, feldstärkeabhängige  $U$ - $I$ -Charakteristik. Aus diesem Grund wurde Siliziumkarbid in der Vergangenheit auch in Überspannungsableitern verwendet, mittlerweile in dieser Anwendung aber durch Zinkoxid ersetzt<sup>2</sup>. Die kommerziell verfügbaren Siliziumkarbid-Füllstoffe variieren jedoch in Größe und Geometrie über weite Bereiche. Dies hat auch Schwankungen im resultierenden Oberflächenwiderstand der gefüllten Lacke und Bänder zur Folge [Kem 2011]. Die geringen Bezugsmengen des überwiegend als Granulat für die Schleifmittelindustrie hergestellten und vertriebenen Siliziumkarbids und die zugleich hohen Qualitätsanforderungen für den Einsatz als teilleitfähiger Füllstoff stoßen bei Herstellern auf wenig Interesse [Lan 2013]. Aus diesen Gründen wird intensiv nach Alternativen zu Siliziumkarbid in diesen Anwendungen geforscht. Vielversprechende, mögliche Füllstoffe zur Substitution von Siliziumkarbid sind zum einen Mikrovaristoren [Deb 2015], zum anderen neu entwickelte Partikel auf Basis von antimondotiertem Zinnoxid (ATO) [Lan 2013].

### 2.5.2 Mikrovaristoren

Als Mikrovaristoren bezeichnet man näherungsweise sphärische Partikel einer dotierten Zinkoxidkeramik (ZnO). *Mikro* kennzeichnet hierbei die Größe dieser Partikel, welche einen Durchmesser von üblicherweise 10  $\mu\text{m}$  bis 160  $\mu\text{m}$  aufweisen [Gre 2004], [Deb 2011]. Der Begriff *Varistor* ist ein Kunstwort, welches für *Variable Resistor*, also zu Deutsch für einen variablen Widerstand steht und die Nichtlinearität dieser Partikel

---

<sup>2</sup>Zinkoxidkeramiken ermöglichen extrem nichtlineare  $U$ - $I$ -Kennlinien, was eine zentrale Forderung für effiziente Überspannungsableiter darstellt und, als besonderen Vorteil gegenüber SiC-Überspannungsableitern, einen Betrieb von Ableitern ohne zusätzliche Serienfunkenstrecke ermöglicht [Hin 2012].

hervorhebt [Ein 1982]. Die charakteristischen Eigenschaften von Mikrovaristoren sind eine stark nichtlineare Spannungs-Strom-Kennlinie und eine sehr hohe Permittivität  $\varepsilon_r$  mit Werten von 300 bis zu 1000 [Sei 2008], [Deb 2011]. Eingemischt in Polymere lassen sich im Verbundwerkstoff resultierende Werte von  $\varepsilon_r \geq 15$  erzielen [Sei 2008].

In Abbildung 2.7 sind Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von Mikrovaristorpartikeln dargestellt<sup>3</sup>.

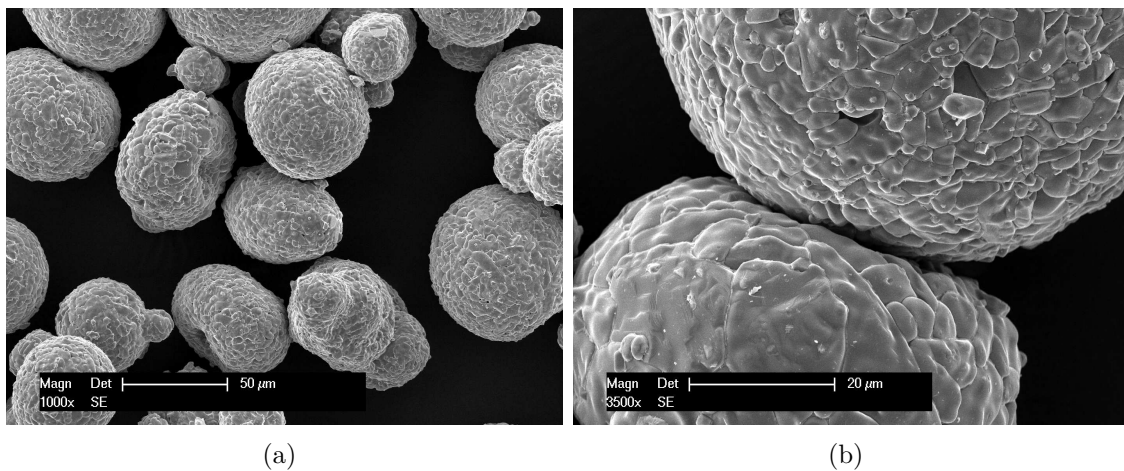


Abbildung 2.7: Rasterelektronenmikroskopien von Mikrovaristorpartikeln: (a) Verschiedene sphärische Ausformungen, (b) Vergrößerung mit Oberflächenstruktur der Partikel

Die nichtlineare Eigenschaft der Partikel wird durch den Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha$  nach Gleichungen 2.12 und 2.13 beschrieben, in Anlehnung an die in der Literatur angegebenen Nichtlinearitätsgleichungen ([Phi 1977], [Gup 1990], [Chr 2010])<sup>4</sup>, wobei  $I$  den Strom,  $U$  die Spannung sowie  $I_0$  und  $U_0$  die zur Bestimmung der Nichtlinearität gewählten Referenzwerte darstellen. In der Regel werden zur Referenz die Werte des ersten gemessenen Kennlinienpunktes verwendet.

<sup>3</sup>Mit freundlicher Unterstützung von Herrn Raschid Baraki, Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe, Technische Universität Darmstadt.

<sup>4</sup>In der Literatur wird meist der Ausdruck  $I = k \cdot U^\alpha$  verwendet, welcher betragsmäßig zur selben Nichtlinearität  $\alpha$  führt, formal aber nicht korrekt ist, da aufgrund der Potenzierung die zugehörigen SI-Einheiten des Ausdrucks ebenfalls potenziert würden.  $k$  stellt in dieser Gleichung eine materialabhängige Konstante dar.

$$\left(\frac{I}{I_0}\right) = \left(\frac{U}{U_0}\right)^\alpha \quad (2.12)$$

$$\alpha = \frac{\ln(I/I_0)}{\ln(U/U_0)} \quad (2.13)$$

Bei Gleichspannungsbeanspruchung kann der Nichtlinearitätsexponent  $\alpha$  Werte von bis zu 70 erreichen [Gra 2003]. Hierdurch können sowohl hohe Leitfähigkeiten bei Pulsbelastungen im Hochstrombereich als auch niedrige Verluste im Arbeitspunkt bei Dauerbetrieb erzielt werden [Gra 2003]. Hervorgerufen wird die Nichtlinearität durch den Aufbau der Partikel. Der Varistoreffekt von Mikrovaristoren ist identisch zu dem bei ZnO-Energievaristoren und beruht auf dem Korngrenzenphänomen [Sch 1994]. Die Herstellung der Mikrovaristoren erfolgt mit Grundstoffen analog zur Herstellung von ZnO-Energievaristoren, allerdings wird für Mikrovaristoren ein Sprühtrocknungsverfahren mit Sintertemperaturen oberhalb von 900 °C angewendet [Don 2011]. ZnO-Körner bilden den Hauptbestandteil eines Mikrovaristorpartikels. Diese werden während des Sintervorganges im Kornwachstum aus den Grundstoffen gebildet. Die ZnO-Körner sind im inneren Bereich halbleitend<sup>5</sup>, jedoch an ihren Randbereichen sehr hochohmig [Gup 1990],[Sch 1994]. An den Korngrenzen der Partikel, deren Anzahl während des Sintervorganges über die Prozessparameter eingestellt werden kann, entstehen Potentialbarrieren [Gra 2003]. Die Durchbruchspannung einer Korngrenze beträgt etwa 3,2 V bis 3,4 V [Ein 1979], [Gre 1990]. In Abbildung 2.8 ist der typische Verlauf einer  $U$ - $I$ -Kennlinie, gemessen an einem einzigen Mikrovaristorpartikel, über mehrere Dekaden mit logarithmischer Skalierung des Stroms dargestellt. Offenbar wurde zwischen vier Korngrenzen gemessen, dies korreliert mit dem charakteristischen, scharfen Abknicken der Kennlinien ab etwa 12 V bis 13 V [Gre 2004].

Essenziell für die Bildung der stark nichtlinearen  $U$ - $I$ -Kennlinie ist die „Dekoration der Korngrenzen mit Bismuth-Ionen  $\text{Bi}^{3+}$ “ [Stü 1987]. Hierdurch entstehen in der Spinel-Phase kleine, hellgraue Kristalle mit einer Größe  $< 3 \mu\text{m}$ , welche an der Oberfläche der Partikel sichtbar sind (vgl. Abbildungen 2.7 und 2.10) [Don 2011]. Die Kombination von weiteren Additiven in der Rezeptur, tieferliegenden Bulk-Donatoren und flachen Donatoren, führt zu den gewünschten Korngrenzen-Barrieren [Sch 1994],

---

<sup>5</sup>ZnO ist ein kristalliner n-Halbleiter mit einer Bandlücke von etwa 3,3 eV [Mey 2004].



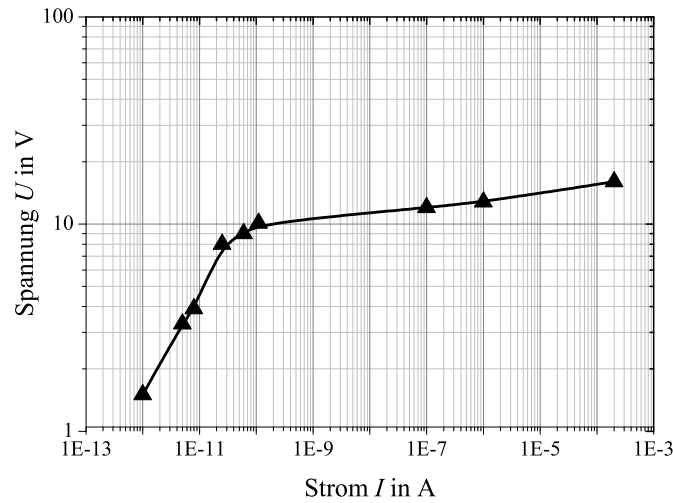


Abbildung 2.8: Gemessene  $U$ - $I$ -Kennlinie an einem Mikrovaristorpartikel mit vier Korngrenzübergängen. Nach Überwindung der Korngrenzen knickt die Kennlinie stark ab, und es wird eine sehr hohe Nichtlinearität von  $\alpha \approx 30 - 40$  erreicht. Diagramm frei nach [Gre 2004]

[Str 1987]. Weiterhin wird in der Literatur Antimon(III)-oxid ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) als wichtiges Additiv zur Steuerung des Kornwachstums und zur Formierung von elektrisch aktiven Zwillingsgrenzen genannt [Cla 1999], [Don 2011]. Durch das Modell einer Doppel-Schottky-Barriere lassen sich die meisten Phänomene an den Korngrenzen erklären [Gre 1990]. Dieses Modell wurde durch Pike [Pik 1982] eingeführt: Zwischen zwei n-halbleitenden Körnern, bei welchen sich das Leitungsband knapp über dem Valenzband befindet, wird eine Zwischenschicht, die Korngrenze, mit unterschiedlichen Defekten und Dotierungen gesetzt (vgl. Abbildung 2.9 (a)). Die Korngrenze wird aus demselben Werkstoff wie die n-halbleitenden Körner angenommen, hier sind allerdings Fremdatome und Gitterdefekte vorhanden. Hierdurch wird ein niedrigeres Fermi-Energieniveau  $E_{\text{Fn}}$  vermutet. Werden die drei Einzelteile nun zusammengefügt, so wird ein thermodynamisches Gleichgewicht angestrebt, d.h. eine identische freie Gibbs-Energie je Elektron. Dies hat zur Folge, dass sich Elektronen an die Korngrenze bewegen und die dort energetisch günstigeren Zustände besetzen. Durch diese Elektronen an der Korngrenze und die benachbarten positiven Donatoren an den beiden Seiten der als unendlich dünn angenommenen Korngrenze bildet sich ein elektrostatisches Feld und demzufolge eine Potentialbarriere  $\Phi_{\text{B}}$  an der Korngrenze aus (vgl. Abbildung 2.9 (b)) [Cla 1999], [Pik 1982].

Der elektrische Widerstand eines Mikrovaristor-Partikels wird also durch die Poten-

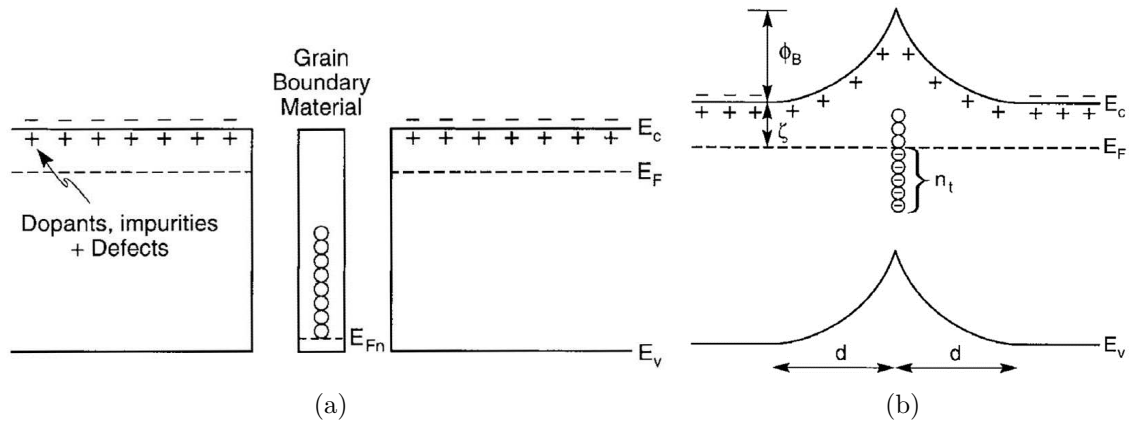


Abbildung 2.9: (a) Zinkoxid-Körner (links, rechts) sowie Korngrenze (mitte) in der Modellvorstellung vor der Zusammenfügung; (b) Zustand nach dem Zusammenfügen und der Ansammlung von Elektronen an der Korngrenze. Infolge des elektrostatischen Feldes entsteht eine Potentialbarriere  $\Phi_B$  an der Grenzschicht. Bildquelle: [Cla 1999], ©1999 The American Ceramic Society.

tialbarrieren  $\Phi_B$  und somit die Anzahl der Korngrenzen bestimmt [Gre 1990]. Ein möglicher Strompfad entlang der Korngrenzenbarrieren von Mikrovaristorpartikeln ist in Abbildung 2.10 (a) dargestellt. Abbildung 2.10 (b) zeigt eine REM-Aufnahme<sup>6</sup> einer Mikrovaristor-Oberfläche, auf welcher einzelne ZnO-Körner (dunkel) und die Korngrenzen zwischen den Körnern mit Spinel-Phasen sichtbar sind. Über die Dotierstoffe und die Sinterparameter können Nichtlinearität, Schaltfeldstärke und Widerstand unabhängig voneinander eingestellt werden [Gla 1996]. Die Schaltfeldstärke hängt direkt mit der Anzahl der in Reihe liegenden Korngrenzen und damit indirekt mit der Größe der ZnO-Körner zusammen. Sie steigt für kleinere Körner an, welche mittels niedriger Sintertemperatur erreicht werden können. Sehr hohe Schaltfeldstärken von mehreren kV/mm werden über einen sehr kurzen Sinterprozess bei sehr geringen Temperaturen erreicht [Don 2011].

Beim Einmischen von Mikrovaristoren in Polymere werden deren Eigenschaften teilweise auf den resultierenden Verbundwerkstoff übertragen [Gre 2004]. Hierbei werden die elektrischen Eigenschaften bei einem Partikelanteil oberhalb der Perkolationsschwelle maßgeblich durch die intrinsischen Eigenschaften der Partikel bestimmt und weniger durch Partikel-Partikel-Übergänge [Don 2011]. Somit ist das System,

<sup>6</sup>Mit freundlicher Unterstützung von Herrn Raschid Baraki, Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe, Technische Universität Darmstadt.

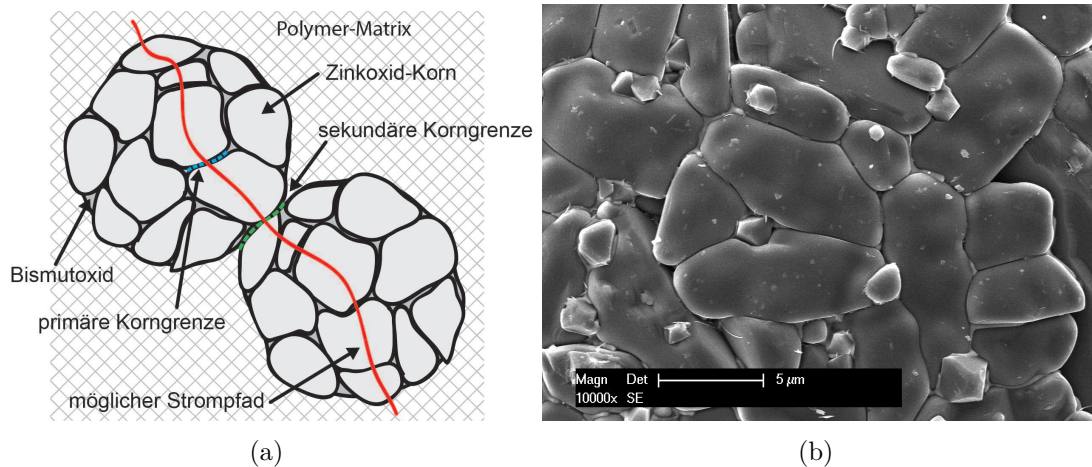


Abbildung 2.10: (a) Modell zum Aufbau von Mikrovaristoren: Primäre und sekundäre Korngrenzen, frei nach [Don 2011]; (b) Rasterelektronenmikroskopie der Oberfläche eines Mikrovaristorpartikels, erkennbar sind die einzelnen ZnO-Körner (dunkelgrau) sowie die kristalline Spinel-Phase (weiß) und die Primärkorngrenzen zwischen den Körnern.

im Gegensatz beispielsweise zu rußgefüllten Systemen, unempfindlich gegenüber kleinen Schwankungen im Füllgrad [Don 2004]. Die elektrische Leitfähigkeit von Mikrovaristoren nimmt mit steigender Temperatur zu, wobei je nach verwendetem Polymer die thermische Ausdehnung des Verbundwerkstoffes konteragieren kann [Don 2011], [Win 2011].

Die erste Anwendung von Mikrovaristoren als Füllstoff in Polymeren zur nichtlinearen Feldsteuerung in Kabelendverschlüssen für die Mittelspannungsebene wurde im Jahr 2000 vorgestellt [Str 2000], [Hav 2000], [Boe 2001]. Als Basismaterial ist ein mikrovaristorgefülltes, hochtemperaturvernetztes Silikon (HTV-Silikon) mit einer Schaltpunktfeldstärke von etwa 1000V/mm (definiert bei einer Stromdichte von  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) kommerziell erhältlich [Wac 2008]. In [Deb 2015] werden Ergebnisse zu mikrovaristorgefüllten Polymeren für den Einsatz als Endenglimmschutz in der Isolation rotierender elektrischer Maschinen sowie zur lokalen elektrischen Feldsteuerung in Verbund-Langstabisolatoren untersucht. Insbesondere für die Anwendung in Freileitungs-Langstabisolatoren werden geringere Schaltpunktfeldstärken zwischen 0,25 kV/mm und 0,5 kV/mm benötigt [Sei 2011]. Erstmalige, praktische Untersuchungen an mikrovaristorgefüllten Langstabisolatoren mit Schaltpunktfeldstärken von 0,5 kV/mm und 1,2 kV/mm zeigten in Beregnungsversuchen eine wirkungs-

volle Unterdrückung der Wassertropfenkorona. Diese wird durch eine galvanische Überbrückung der sich bildenden Trockenzonen infolge der lokalen Feldsteuerung begründet [Deb 2015]. Messergebnisse zu Mikrovaristorpulvern, also reinen Mikrovaristorpartikeln, werden in [Mül 2012] ausführlich dargestellt.

Über mikrovaristorgefüllte Polymere mit höheren Schaltpunktfeldstärken als 1,2 kV/mm wurde bisher nicht in der Literatur berichtet. Im Rahmen dieser Arbeit werden Mikrovaristoren, welche Schaltpunktfeldstärken von mehreren kV/mm ermöglichen, durch einen Hersteller erstmals als Labormuster angefertigt und als Füllstoff in Isolierwerkstoffen charakterisiert.

### 2.5.3 Partikel mit nanoskaliger dotierter Zinnoxidbeschichtung

Zinnoxid ( $\text{SnO}_2$ ) ist ein intrinsischer n-Halbleiter mit einer relativ hohen Bandlücke von etwa 3,6 eV [Bat 2005], [Mao 2013]. Häufig wird Antimon (Sb) zur Dotierung von Zinnoxid verwendet [Gor 2000]. Antimondotiertes Zinnoxid ( $\text{Sb}_2\text{SnO}_5$ , oft abgekürzt mit ATO, engl. *Antimon-Tin-Oxide*) wird in Lacken oder Schichten zur Herstellung von transparenten oder hellen, leitfähigen Beschichtungen verwendet. In der Literatur wurden halbleitende Beschichtungen von Freiluft-Hochspannungsisolatoren mit hochresistiven, nichtlinearen Eigenschaften aus antimondotiertem Zinnoxid untersucht [Gha 1980]. Ein halbleitender Lack auf Basis von dotiertem Zinnoxid ist bereits durch einen Hersteller patentiert und wird kommerziell vertrieben [Hig 1978]. Untersuchungen an halbleitend beschichteten Isolatoren zeigten eine Verbesserung des Überschlagverhaltens sowie eine bessere Potentialverteilung; den begrenzenden Faktor stellen die elektrischen Verluste der Beschichtung dar [Els 2000].

Über die Antimonkonzentration im Zinnoxid kann die elektrische Leitfähigkeit über weite Bereiche eingestellt werden. Bisher lagen die elektrischen Widerstände derartiger Beschichtungen unterhalb der benötigten Größenordnung für Gleichspannungsisolatoren in gasisolierten Anlagen. In jüngster Vergangenheit wurden für die Anwendung im Endenglimmschutz (EGS) elektrischer Maschinen neue, hochohmige Partikel entwickelt und hergestellt. Auf Glimmerplättchen als Trägermaterial wurde hierfür eine halbleitende ATO-Beschichtung mit einer Schichtdicke im Nanometer-Bereich aufgebracht, vgl. Abbildung 2.11. Diese Partikel wurden für Anwendungen im EGS ausführlich in [Lan 2013] und [Rüg 2012b] charakterisiert.

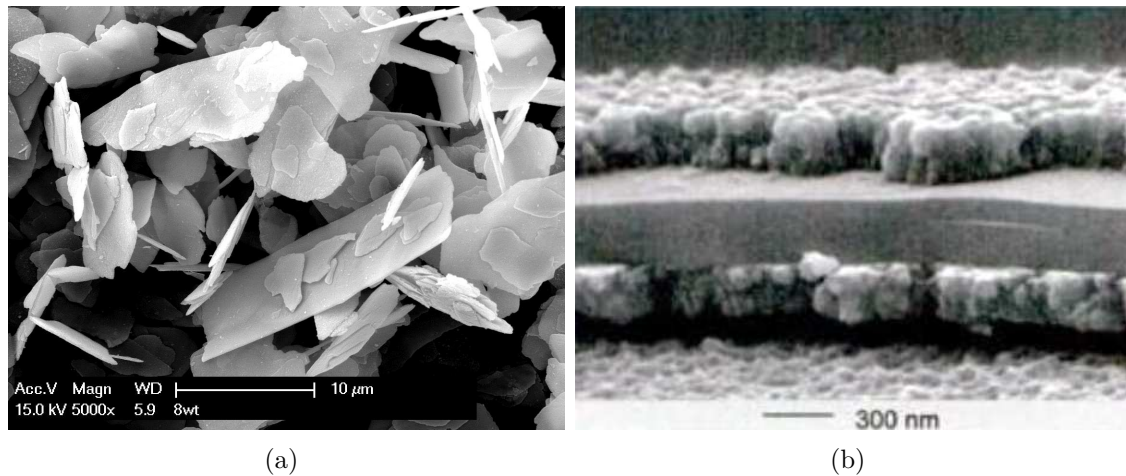


Abbildung 2.11: Rasterelektronenmikroskopien von Partikeln auf Glimmerbasis mit nanoskaliger, dotierter SnO<sub>2</sub>-Beschichtung. Gut erkennbar ist die plättchenförmige Struktur der Partikel (a); in Abbildung (b) (Bildquelle: [Pfa 2007], ©2007 Vincentz Network) ist das Glimmerplättchen mittig, umhüllt von der feinkörnigen, nanoskaligen Beschichtung an einer Bruchkante eines Partikels gut erkennbar.

In der bisher verfügbaren Herstellungsweise konnte (ebenfalls auf Glimmerpartikeln als Trägermaterial) über die Antimonkonzentration in der Zinnoxidschicht ein Schichtwiderstandsbereich von  $R_S = 8 \cdot 10^3$  bis  $8 \cdot 10^{10} \Omega$  eingestellt werden<sup>7</sup>. Gemessen wurden diese Widerstandswerte bei einer elektrischen Feldstärke  $E = 0,1 \text{ kV/mm}$  an einer dünnen Lackschicht, welche überperkolativ mit diesen Partikeln gefüllt wurde [Rüg 2012b]. Die relativ hohe elektrische Leitfähigkeit des reinen Zinnoxids liegt in den Sauerstoffleerstellen im Kristallgitter begründet [Kil 2002], sowie in leichten, herstellungsbedingten Verunreinigungen [Lan 2013]. Zur Erhöhung des Widerstands wurde die Größe der Primärkörner der halbleitenden Schicht reduziert und somit die Anzahl der Potentialbarrieren erhöht [Lan 2013], analog zur Vorgehensweise bei Mikrovaristoren [Gre 1990]. Als weitere Maßnahme wurde eine zweite, nur wenige Nanometer dicke Schicht aus Titandioxid (TiO<sub>2</sub>) auf die Partikel aufgebracht. Im Herstellungsprozess diffundiert das Titandioxid während des Glühvorgangs zum Teil in die Korngrenzen des Zinnoxids und bewirkt dort eine weitere Erhöhung des elektrischen Widerstands [Lan 2013]. Hierdurch kann beim Einmischen dieser Partikel

<sup>7</sup>Der Schichtwiderstand  $R_S$  ist ein Maß für den Widerstand von dünnen Schichten, die nominal eine einheitliche Dicke aufweisen. Gemessen wird an einer rechtwinkligen Elektrodenanordnung mit einem Abstand  $L$  und einer Elektrodenbreite  $w$ .  $R_S = R/(L/w)$  wird in der Einheit  $\Omega$  angegeben, der elektrische Strom  $I$  muss entlang der Schicht fließen [IEC 62607-2-1].

(*Minatec SCM E12*<sup>®</sup>, vgl. Abbildung 2.12 (b)) im Verbundwerkstoff ein sehr hoher Schichtwiderstand  $R_S = 1,5 \cdot 10^{13} \Omega$  bei einer elektrischen Feldstärke  $E = 0,1 \text{ kV/mm}$  gemessen werden. Ein weiterer Partikeltyp, *Minatec SCM E08*<sup>®</sup>, aus demselben Trägermaterial mit identischen Größenverteilungen, wurde mit einer etwas grobkörnigeren halbleitenden Struktur hergestellt, vgl. Abbildung 2.12 (a). Der Schichtwiderstand dieser Partikel beträgt  $R_S = 2 \cdot 10^8 \Omega$  (gemessen bei  $E = 0,1 \text{ kV/mm}$ ) [Lan 2013]. Durch Abmischen der beiden Partikeltypen kann anhand des Mischungsverhältnisses jeder beliebige Wert zwischen  $R_S = 2 \cdot 10^8 \Omega$  und  $R_S = 1,5 \cdot 10^{13} \Omega$  gezielt eingestellt werden [Rüg 2012a].

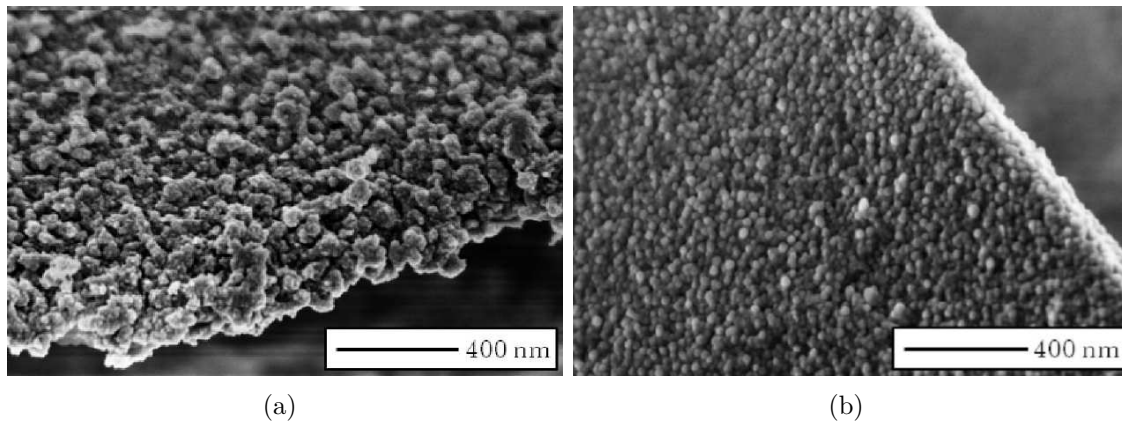


Abbildung 2.12: Rasterelektronenmikroskopien der neu entwickelten Partikel auf Glimmerbasis mit nanoskaliger, dotierter  $\text{SnO}_2$ -Beschichtung. (a) Partikeltyp *Minatec SCM E08*<sup>®</sup>; (b) Partikeltyp *Minatec SCM E12*<sup>®</sup> mit besonders feiner Zinnoxidschicht. Bildquelle: [Lan 2013]

Einfluss auf den Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha$  haben bei der Herstellung der Partikel die Fällbedingungen im nasschemischen Beschichtungsprozess, die Menge an Dotierelementen sowie die Schichtungshöhe im Glühofen. Insbesondere hat jedoch die Glühtemperatur eine große Auswirkung, welche bei hohen Werten eine Verringerung von  $\alpha$  zur Folge hat. Der Nichtlinearitätsexponent der *Minatec SCM E08*<sup>®</sup> Partikel beträgt  $\alpha = 4$ . Bei den höherohmigen *Minatec SCM E12*<sup>®</sup> Partikeln wurde infolge der erhöhten Glühtemperatur sowie der zusätzlichen  $\text{TiO}_2$ -Sperrschicht ein geringerer Wert von  $\alpha = 3$  ermittelt. Die Antimonkonzentration ist in beiden Partikeltypen identisch und beträgt etwa 0,2 mol.% [Lan 2013].

Die planare Struktur der Partikel (vgl. Abbildung 2.11) bewirkt in Kombination mit der halbleitenden Beschichtung ein stark anisotropes elektrisches Verhalten dieses

Füllstoffes. In dünnen Schichten kann hierdurch mit geringeren Füllstoffkonzentrationen eine stabile, reproduzierbare Leitfähigkeit eingestellt werden [Rüg 2012b]. Besonders vorteilhaft bei der Verarbeitung der Füllstoffpartikel ist eine flache Perkolationskurve, welche im Gegensatz zu rußgefüllten Systemen um weniger als zwei Dekaden variiert, gemessen am Oberflächenwiderstand einer Lackschicht mit Pigmentmassenkonzentrationen zwischen 30 und 60 Prozent. Generell sind auch globulare Partikel als Trägermaterial für die hier dargestellten halbleitenden Beschichtungen realisierbar.

Die neu entwickelten planaren Füllstoffpartikel, *Minatec SCM E08*<sup>®</sup> und *Minatec SCM E12*<sup>®</sup>, wurden speziell für den Einsatz in Endenglimmschutzsystemen entwickelt und optimiert. Durch den sehr hohen Widerstandswert stellt *Minatec SCM E12*<sup>®</sup> einen möglichen Füllstoff für Gleichspannungs-Isolatoren in gasisolierten Anlagen dar.

Bisher wurde dieser jüngst entwickelte Partikeltyp nicht für diese Anwendung untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt erstmals eine ausführliche Charakterisierung dieses ATO-Füllstoffes in Gießharzen für Hochfeld-Gleichspannungs-Isoliersysteme. Hierzu werden ausschließlich die Partikel des Typs *Minatec SCM E12*<sup>®</sup> verwendet.





### 3 Ziele der Arbeit

Im Zuge der Einführung neuer Hochspannungs-Gleichspannungsnetze werden dringend neue Isolierwerkstoffe benötigt, welche den Anforderungen bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung in gasisolierten Anlagen und der damit verbundenen Hochfeldbeanspruchung gerecht werden. Wie anhand der einleitenden Kapitel herausgearbeitet wurde, müssen hierfür folgende Ziele erreicht werden:

- Elektrische Feldverteilung: Es wird insbesondere eine gleichmäßige, stationäre resistive Feldverteilung angestrebt. Diese wird, neben der Geometrie des Isolators, maßgeblich durch die elektrische Leitfähigkeit des Isolierwerkstoffs bestimmt. Ein rascher Übergang von der initialen, kapazitiven Feldverteilung zur stationären, resistiven Feldverteilung wird ebenfalls durch eine Erhöhung der Leitfähigkeit erreicht.
- Ladungsträgerakkumulation: Generell findet bei Beanspruchung mit Gleichspannung in der Praxis immer eine Ansammlung von Ladungsträgern an Grenzflächen statt. Um die Akkumulation zusätzlicher Ladungsträger zu vermeiden, welche in der Regel infolge von Partikeln, Feldemission oder Teilentladungen durch den Gasraum auf die Isolierstoffoberflächen gelangen, wird ein rascher Ladungsabfluss angestrebt. Dies soll anhand einer Anpassung der elektrischen Leitfähigkeit erfolgen. Können Ladungsträger während eines Polaritätswechsels rasch genug abgeführt werden, verhindert dies Feldüberhöhungen. Der zusätzliche Einfluss nichtlinear leitfähiger Werkstoffe auf das Abflussverhalten soll ebenfalls untersucht werden.
- Elektrische Leitfähigkeit: Die Leitfähigkeit ist der zentrale Parameter bei der Betrachtung von Isolierwerkstoffen für Gleichspannungsbeanspruchung. Um den zuvor genannten Aspekten Rechnung zu tragen, muss ein bestimmter Wert der Leitfähigkeit des Werkstoffes eingestellt werden. Die Leitfähigkeit weist

bei den meisten Werkstoffen eine starke Abhängigkeit von anderen Parametern auf, insbesondere der Temperatur, der Feuchtigkeit und der elektrischen Feldstärke. Aber auch Alterungsprozesse können die Leitfähigkeit des Werkstoffes beeinflussen. Für die Charakterisierung von Prüflingen werden daher geeignete Versuchsstände benötigt, welche Messungen unter Berücksichtigung der Einflussgrößen ermöglichen. Für Untersuchungen zum Alterungsverhalten wird ein Langzeitversuchsstand mit kombinierter thermischer und elektrischer Beanspruchung notwendig. Es existieren noch keine Normen zur Durchführung und Auswertung beschleunigter Langzeitversuche an funktionell gefüllten Isoliermaterialien. Grundsätzlich können sich die Füllstoffe und die umgebende Polymermatrix unterschiedlich verhalten. Es sind daher Versuchsbedingungen erst zu definieren und entsprechende Versuche anschließend durchzuführen.

Der Ansatz zur Erzeugung eines adäquaten Isolierwerkstoffes für Hochfeld-Gleichspannungsbeanspruchung ist ein definiertes Einstellen der elektrischen Leitfähigkeit des Isolierwerkstoffes mittels Füllstoffpartikeln. Daher sollen in dieser Arbeit geeignete Füllstoffe identifiziert und anhand von Berechnungen und Messungen charakterisiert werden. Hierzu sind insbesondere die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Es muss ein Kompromiss aus einer guten elektrischen Feldverteilung, raschem Abfluss von Störladungsträgern, akzeptablen elektrischen Verlusten im Dauerbetrieb sowie Überspannungsfestigkeit gefunden werden. Die Dimensionierung soll zunächst anhand von Feldberechnungen erfolgen.
- Zunächst soll die Auswahl solcher möglicher Füllstoffe erfolgen, welche eine klar definierte, gut reproduzierbare elektrische Leitfähigkeit des resultierenden Isolierwerkstoffes ermöglichen. Die elektrische Leitfähigkeit des resultierenden, gefüllten Werkstoffes sollte einstellbar sein, und die Eigenschaften sollten möglichst unempfindlich gegenüber Füllstoffschwankungen sein
- Anschließend müssen die gewählten Füllstoffe in Isolierwerkstoffe eingemischt werden. Im Falle von gasisolierten Isoliersystemen liegt der Schwerpunkt hierbei auf der bereits seit Jahrzehnten etablierten Gießharztechnologie. Unter Verwendung der erstellten Prüfkörper sollen die Eigenschaften der gefüllten Werkstoffe in Versuchen untersucht werden. Neben der Untersuchung an Werkstoffproben zur grundsätzlichen Ermittlung der Feldstärke- und Temperaturabhängigkeit

---

sowie des Langzeitverhaltens soll an zylindrischen Prüfkörpern auch das Verhalten bei produktnahen Abmessungen in einem SF<sub>6</sub>-gasisolierten Versuchsaufbau durchgeführt werden. Abschließend sollen die messtechnisch gewonnenen Ergebnisse theoretisch beleuchtet und als Eingangsparameter für Feldberechnungen verwendet werden.

Im Folgenden werden die Ziele der Messungen an Prüflingen des mit neuartigen Füllstoffpartikeln gefüllten Isolierwerkstoffs kurz zusammengefasst:

- Der mit den ausgewählten Partikeln gefüllte Werkstoff muss für die in gasisolierten Anlagen auftretenden, hohen elektrischen Feldstärken im Dauerbetrieb und im Falle von stationären und transienten Überspannungen ausgelegt sein.
- Der neue Werkstoff muss eine moderate Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von den Umgebungsbedingungen, insbesondere von der Temperatur, besitzen.
- Ebenso muss der neue Werkstoff ein stabiles Langzeitverhalten aufweisen, d.h. die elektrische Leitfähigkeit soll über die gesamte Lebensdauer einer Anlage möglichst konstant sein. Dies soll anhand von Langzeitversuchen mit kombinierter thermischer und elektrischer Beanspruchung überprüft werden.
- Es soll geklärt werden, ob durch eine Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der elektrischen Feldstärke der Effekt der Feldinversion bei hohen Temperaturen am Innenleiter abgeschwächt oder gar kompensiert werden kann. Diese Untersuchung soll anhand von Feldberechnungen unter Einbeziehung der Temperatur- und Feldstärkeabhängigkeit erfolgen.



## 4 Funktionell gefüllte Isolierwerkstoffe für DC-GIS-Isoliersysteme

Für die Auslegung des zu entwickelnden Isolierwerkstoffs für kompakte HGÜ-Isolatoren werden anhand von Berechnungen und FEM-Feldsimulationen geeignete Parameter evaluiert. Um den Forderungen nach einem raschem Abbau von Störladungen, einer guten Ladungsverteilung entlang der Oberfläche des Isolators, einer optimalen Feldverteilung und akzeptablen elektrischen Verlusten gerecht werden zu können, muss ein Kompromiss eingegangen werden, da sie in widersprüchliche Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit münden.

### 4.1 Anforderungen an den Isolierwerkstoff

Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit bestehen noch keine Normen zu Prüfspannungen in DC-GIS-Anwendungen. Im Falle einer 500 kV DC-GIS-Prototyp-Anlage wurden die Prüfspannungs-Parameter gemäß Tabelle 4.1 verwendet. Unter Annahme eines (Innen-)Durchmessers der Kapselung von  $d_a = 800$  mm sowie eines (Außen-)Durchmessers des Innenleiters von  $d_i = 140$  mm für eine 500 kV DC-GIS<sup>1</sup> ergeben sich im reinen Isoliertgas in einer idealen Koaxialanordnung anhand von Gleichung 4.1 Maximalfeldstärken gemäß Tabelle 4.2, und die Feldstärke nimmt mit einer  $1/r$ -Abhängigkeit mit dem Abstand vom Innenleiter ab.

---

<sup>1</sup>Die japanische Prototyp-Anlage weist größere Abmessungen auf, nämlich einen Kapselungsdurchmesser von 1000 mm und einen Durchmesser des Innenleiters von 240 mm [Cig 2012a].

Tabelle 4.1: Prüfspannungsparameter für 500 kV DC-GIS [Has 1997],[Cig 2012a]

Art der Prüfspannung	Prüfparameter
Betriebsspannung (DC)	$\pm 500 \text{ kV}$
Prüf-Überspannung (DC)	$1,5 \cdot \pm 500 \text{ kV} = \pm 750 \text{ kV}$ für 2 Stunden, anschließend für eine Minute $\pm 900 \text{ kV}$ , gefolgt von erneut 2 Stunden mit $\pm 750 \text{ kV}$ Prüfspannung
Polaritätswechsel (DC)	2 Stunden $+625 \text{ kV}$ , anschließend Polaritätswechsel innerhalb von 1 Minute, danach 30 Minuten $-625 \text{ kV}$ Prüfspannung. Außerdem identisches Prüfprozedere mit umgekehrter Polarität
Blitzstoßspannung	$\hat{u}_{\text{Blitz}} = \pm 1300 \text{ kV}$
Schaltstoßspannung	$\hat{u}_{\text{Schalt}} = \pm 1175 \text{ kV}$
AC-Prüfspannung (eff.)	30 Minuten $559 \text{ kV}$ , gefolgt von 5 Minuten $645 \text{ kV}$ und weiteren 30 Minuten $559 \text{ kV}$

$$E_{\max} = \frac{U}{r_i \cdot \ln(r_a/r_i)} \quad (4.1)$$

Es gilt zu beachten, dass die Feldstärken im Isolierwerkstoff insbesondere bei Anordnungen mit Quergrenzflächen geringere Maximalwerte aufweisen werden. Ursächlich hierfür ist die Feldverdrängung des stationären Strömungsfeldes in den niedriger leitfähigen Raum (also in das Isoliergas). Außerdem werden feldsteuernden Maßnahmen in der praktischen Ausführung der Isolatoren, beispielsweise eingebettete Elektroden, die Maximalfeldstärken am Isolator reduzieren. Bei Verwendung eines nichtlinear leitfähigen Isolierwerkstoffs wird zusätzlich eine Steuerung des elektrischen Feldes vorliegen und somit die Maximalfeldstärke im Isolierwerkstoff weiter reduziert werden.

Tabelle 4.2: Zu erwartende Maximalfeldstärken am Innenleiter einer coaxialen Zylinderanordnung mit homogenem Dielektrikum bei Prüfspannungen gemäß Tabelle 4.1 und Abmessungen  $r_i = 70 \text{ mm}$ ,  $r_a = 400 \text{ mm}$ 

Prüfspannung	$E_{\max}$
$U \text{ (DC)} = 500 \text{ kV}$	$4,10 \text{ kV/mm}$
$U \text{ (DC)} = 750 \text{ kV}$	$6,15 \text{ kV/mm}$
$U \text{ (DC)} = 900 \text{ kV}$	$7,38 \text{ kV/mm}$
$\hat{u}_{\text{Schalt}} = 1175 \text{ kV}$	$9,63 \text{ kV/mm}$
$\hat{u}_{\text{Blitz}} = 1300 \text{ kV}$	$10,66 \text{ kV/mm}$

Ein weiterer, außerordentlich wichtiger Aspekt für die Auslegung bei Gleichspannungsbeanspruchung sind, aufgrund der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit, die zu erwartenden Temperaturen. Welchen Temperaturen der Isolierwerkstoff im Betrieb einer DC-GIS ausgesetzt ist, hängt maßgeblich von den Betriebsströmen und von der Wärmeableitung zur Umgebung der Anlage ab. Gemäß [IEC 62271-1] betragen die maximal zulässigen Temperaturen für SF<sub>6</sub>-isolierte Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen für geschraubte Kontakte 115 °C, für Kuppelkontakte 105 °C sowie für Gehäuseteile, welche berührt werden können, 70 °C. Wegen des heißen Innenleiters und der durch die Umgebung gekühlten Kapselung ist bei gasisolierten Schaltanlagen ein Temperaturgradient entlang der Isolierstrecke und dementsprechend auch ein Temperaturgradient entlang des Isolators zu erwarten. In gewissen Grenzen kann dieser Temperaturgradient nützlich sein, um infolge einer erhöhten Leitfähigkeit des Isolators am Innenleiter die Maximalfeldstärken zu reduzieren. Je nach Ausprägung des Temperaturgradienten und der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit des Isolierwerkstoffs kann dies jedoch sogar dazu führen, dass die maximale Feldstärke im Bereich des Isolators nicht mehr am Innenleiter, sondern an der Kapselung auftritt [Her 2013], [Rie 2013]. Dieser Effekt, die sogenannte Feldinversion, ist bereits bei anderen Gleichspannungsanwendungen bekannt und tritt insbesondere bei VPE-Energiekabeln auf [Rie 2001].

## 4.2 Auslegungsbeispiel für mikrovaristorgefüllte Polymere

Bei der Charakterisierung von Mikrovaristoren gilt es zu unterscheiden, ob die reinen Partikel (in Pulverform) oder ein mit Mikrovaristoren gefüllter Werkstoff betrachtet wird. Untersuchungen zu den Eigenschaften verschiedener Mikrovaristor-Pulverproben werden unter anderem in [Mül 2012] und [Deb 2015] dargestellt. In [Deb 2015] wird anhand von Messungen aufgezeigt, dass sich die gemessene Kennlinie eines reinen Mikrovaristorpulvers von der Kennlinie eines mit dem selben Typ Mikrovaristoren gefüllten Polymers stark unterscheidet.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Charakterisierung von funktionell gefüllten Isolierwerkstoffen, deshalb werden ausschließlich mikrovaristorgefüllte Polymere charakterisiert und ausgelegt.

## Ermittlung der benötigten Kennlinie

Bereits in Kapitel 2 wurde dargestellt, dass mikrovaristorgefüllte Polymere in der bisherigen Anwendung als feldsteuernder Werkstoff für Kabelgarnituren speziell hierfür ausgelegt wurden und, eingemischt in HTV-Silikon, eine hierfür optimale Schalt punktfeldstärke<sup>2</sup> von  $E_b \approx 1 \text{ kV/mm}$  aufweisen. In einem Forschungsvorhaben zur Anwendung mikrovaristorgefüllter Polymere in Langstabisolatoren wurde festgestellt, dass dort geringere Schalt punktfeldstärken von  $E_b \leq 0,5 \text{ kV/mm}$  benötigt werden. Entsprechende mikrovaristorgefüllte HTV-Silikonprüfkörper wurden hergestellt und charakterisiert [Deb 2015].

Anhand der im vorigen Abschnitt dargestellten Ausführungen zu den Abmessungen und zu erwartenden Feldstärken in DC-GIS wird deutlich, dass für diese Anwendung deutlich höhere Schalt punktfeldstärken benötigt werden. Insbesondere gilt bei der Anwendung in Isolierwerkstoffen, dass die Schalt punktfeldstärke derart gewählt werden muss, dass auch bei auftretenden Überspannungen niemals der hoch leitende Bereich der Kennlinie oberhalb der Schalt punktfeldstärke erreicht wird. Bei allen im folgenden dargestellten Kennlinien handelt es sich Gleichspannungs-Kennlinien.

Zur Ermittlung der für Gleichspannungs-Isolierwerkstoffe benötigten Kennlinie mikrovaristorgefüllter Polymere wird die gemessene Kennlinie eines mikrovaristorgefüllten Polymers mit  $E_b = 1 \text{ kV/mm}$  zugrunde gelegt und auf höhere Schalt punktfeldstärken skaliert. Die Skalierung erfolgt derart, dass die Schalt punktfeldstärke in den modellierten Kennlinien  $2 \text{ kV/mm}$ ,  $4 \text{ kV/mm}$ ,  $6 \text{ kV/mm}$  und  $8 \text{ kV/mm}$  beträgt (vgl. Abbildung 4.1). In Abbildung 4.2 ist der feldstärkeabhängige Verlauf der Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha(E)$  der fünf modellierten Kennlinien dargestellt. Die Werte wurden jeweils zwischen zwei Kennlinienpunkten anhand der Gleichung 4.2 bestimmt.

$$\alpha_n(E) = \frac{\ln(J_n/J_{n-1})}{\ln(E_n/E_{n-1})} \quad (4.2)$$

Anschließend wird ein stark vereinfachtes Modell eines trichterförmigen Schottisolators in einem Simulationsprogramm, welches nach der Finiten-Elemente-Methode

---

<sup>2</sup>Als Schalt punktfeldstärke  $E_b$  wird in dieser Arbeit der Wert der Feldstärke bei Gleichspannungsbeanspruchung bezeichnet, welcher zum Erreichen einer Stromdichte von  $J = 1 \mu\text{A/cm}^2$  vorherrschen muss. In der Literatur sind unterschiedliche Begriffe und Definitionen veröffentlicht [Mül 2012]. Es besteht daher keine einheitliche Definition für die Schalt punktfeldstärke  $E_b$ .



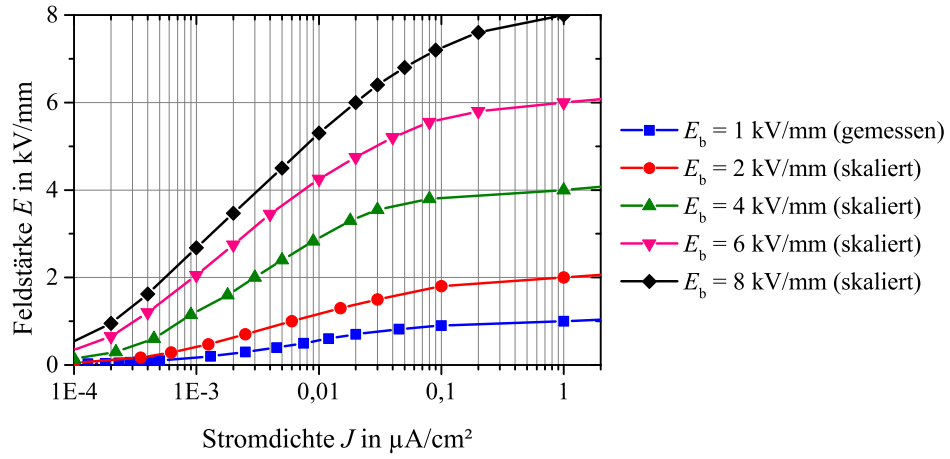


Abbildung 4.1: Gemessene  $E$ - $J$ -Kennlinie eines mikrovaristorgefüllten HTV-Silikons mit einer Schaltpunktfeldstärke  $E_b = 1 \text{ kV/mm}$  (Messung mit Gleichspannung) und daraus auf höhere Schaltpunktfeldstärken skalierte Kennlinien,  $E_b = 2, 4, 6$  und  $8 \text{ kV/mm}$ .

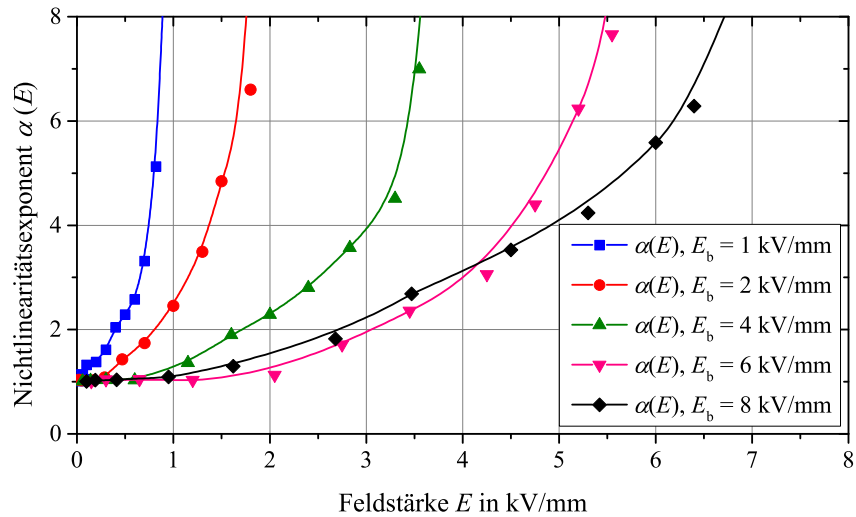


Abbildung 4.2: Verlauf der Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha(E)$  der modellierten Kennlinien der Abbildung 4.1

(FEM) rechnet<sup>3</sup>, erstellt. Das Programm bietet die Möglichkeit, nichtlinear leitfähige Werkstoffe nachzubilden, so dass von der elektrischen Feldstärke abhängige Kennlinien der elektrischen Leitfähigkeit als Eingabegröße definiert werden können. Das Modell wird 2D-axialsymmetrisch erstellt, der Durchmesser der Kapselung wird zu 800 mm gewählt und der Durchmesser des Innenleiters zu 140 mm. Der trichterförmige Schottisolator ist stark vereinfacht modelliert, ohne optimierte Geometrie und eingebettete Elektroden, in einem Einbauwinkel von 45°. Für die Volumenleitfähigkeit wird ein konventionelles Isoliermaterial mit  $\kappa_{\text{Isol}} = 10^{-16} \text{ S/m}$  angenommen. Auf der konvexen und konkaven Oberfläche des Isolators wird jeweils eine 5 mm dicke Volumenschicht modelliert<sup>4</sup>, welche nacheinander mit den verschiedenen nichtlinearen Leitfähigkeiten der modellierten, nichtlinearen Kennlinien sowie zu Vergleichszwecken mit einer als konstant angenommenen, erhöhten elektrischen Leitfähigkeit von  $\kappa_{\text{konst}} = 10^{-14} \text{ S/m}$  angenommen wird. Berechnet wird der stationäre Zustand, in welchem ausschließlich die Leitfähigkeiten die Feldverteilung im stationären Strömungsfeld bestimmen. Das Potential am Innenleiter wird zu 600 kV gewählt, um neben einer kompakteren Abmessung auch eine höhere Betriebsspannung nachzubilden, und somit der durch einen neuartigen Isolierwerkstoff angestrebten Reduzierung der Anlagenabmessungen gerecht zu werden. Die Leitfähigkeit des Isoliergases wird mit einem konstanten Wert von  $\kappa_{\text{Gas}} = 10^{-18} \text{ S/m}$  definiert. Die Gasleitfähigkeit spielt aufgrund der erhöhten Leitfähigkeit der Schicht des Isolators eine untergeordnete Rolle<sup>5</sup>. Im Falle von konventionellen Isolierwerkstoffen mit geringeren Leitfähigkeiten darf diese Vereinfachung nicht getroffen werden, wie Feldberechnungen mit einem komplexen Gasmodell in [Win 2012] belegen.

Abbildung 4.3 (a) stellt exemplarisch das Simulationsergebnis für die nichtlineare Kennlinie mit  $E_b = 6 \text{ kV/mm}$  dar. In der Übersicht ist gut erkennbar, dass der Betrag der elektrischen Feldstärke im Bereich des Isolators reduziert wird und die Äquipotentiallinien entlang des Isolators vom Innenleiter weg gedrängt werden. Die Vergrößerung (Abbildung 4.3 (b)) veranschaulicht zudem anhand der Darstellung

---

<sup>3</sup>Verwendet wurde *Comsol Multiphysics*® in der Version 3.5a.

<sup>4</sup>Die Beschränkung auf eine 5 mm dicke Schicht mit erhöhter Leitfähigkeit soll die elektrischen Verluste reduzieren. Außerdem ermöglicht der Kern aus konventionellem Isolierwerkstoff die Erfüllung der mechanischen Anforderungen an das Bauteil. Weiterhin ist eine komplette Volumenfüllung aus Kostengründen unrealistisch.

<sup>5</sup>Eine Variation der Leitfähigkeit des Isoliergases im Bereich  $10^{-17} \text{ S/m}$  bis  $10^{-20} \text{ S/m}$  führte zu marginalen Veränderungen im Nachkomma-Bereich der Ergebnisse der tangentialen Feldverteilung entlang der Isolatoroberfläche und des Betrags der elektrischen Feldstärke in der 5 mm dicken Schicht.

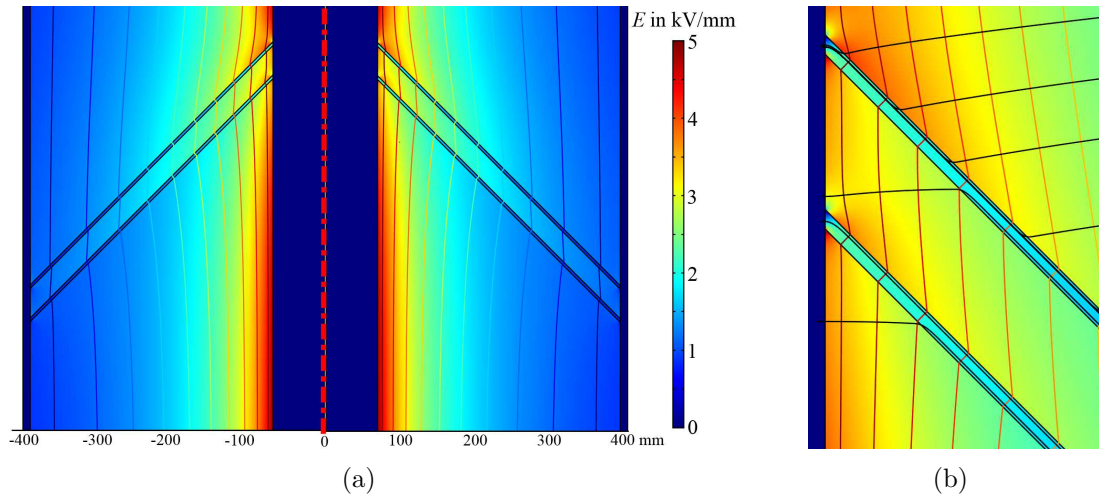


Abbildung 4.3: (a) Darstellung des 2D-axialsymmetrischen Simulationsergebnisses für eine mikrovaristorgefüllte Isolierwerkstoff-Schicht mit  $E_b = 6 \text{ kV/mm}$  im stationären Strömungsfeld (resistive Feldverteilung) bei einer Spannung  $U = 600 \text{ kV}$  [Ten 2010]. Dargestellt sind Äquipotentiallinien sowie der Betrag der elektrischen Feldstärke  $E$  (Farbverlauf); (b) Vergrößerung des Bereichs Innenleiter-Isolator mit Feldlinien (schwarz) und Äquipotentiallinien (rot).

mit Feldlinien, dass diese an der leitfähigen Schicht gebrochen werden und das elektrische Feld im Inneren der Schicht ausschließlich eine Tangentialkomponente besitzt. Temperaturabhängigkeiten oder Temperaturgradienten sind bei diesen Betrachtungen, welche der generellen Ermittlung der benötigten Kennlinie dienen, noch nicht berücksichtigt. Detaillierte Betrachtungen sind auch nicht zielführend, so lange die genauen Parameter der Temperaturabhängigkeit sowie der reale Verlauf der elektrischen Kennlinie bei höheren Schaltpunktfeldstärken noch nicht bekannt sind. Komplexere Simulationen, welche dies berücksichtigen, werden im späteren Verlauf dieser Arbeit (Kapitel 8) dargestellt. Dort fließen insbesondere die anhand von praktischen Messungen gewonnenen Ergebnisse in die Berechnungen ein, und es erfolgt dort eine Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit.

Im Diagramm der Abbildung 4.4 ist der Verlauf der tangentialen Komponente der elektrischen Feldstärke entlang der konvexen Oberfläche der Grenzfläche Isolator-Isoliergas dargestellt. Da die Feldverteilung im Inneren der Schicht nahezu tangential verläuft und die tangentiale Komponente an Grenzflächen stetig ist, ist der gezeigte Feldverlauf identisch zum Feldverlauf innerhalb der leitfähig eingestellten

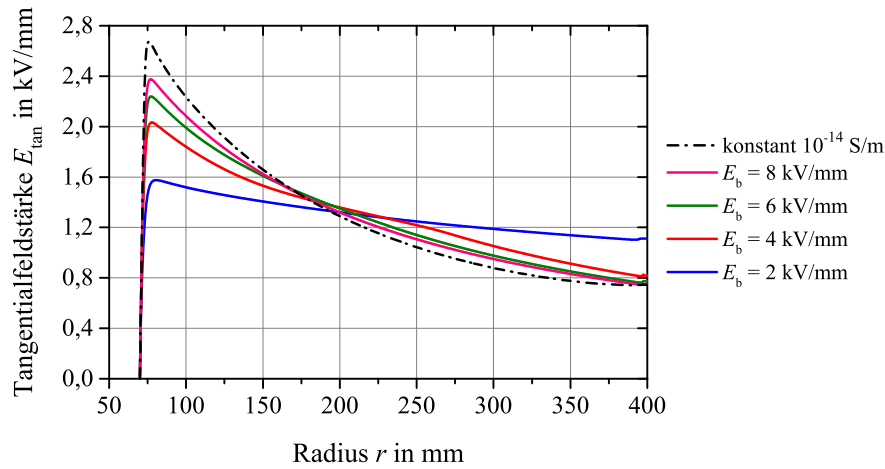


Abbildung 4.4: Verlauf der tangentialen elektrischen Feldstärke entlang der konvexen Isolatoroberfläche für die verschiedenen angenommenen Konfigurationen der Volumenschicht an der Oberfläche des Isolators bei  $U = 600$  kV und resistiver Feldverteilung (stationäres Strömungsfeld) [Ten 2010]

Volumenschicht<sup>6</sup>.

Aus Abbildung 4.4 ist ersichtlich, dass im Verlauf der Kennlinie mit  $E_b = 2$  kV/mm ein nahezu homogener Verlauf erreicht wird. Dies liegt daran, dass der Arbeitspunkt der Kennlinie sich oberhalb des Knickpunkts in dem daran anschließenden stark nichtlinearen Verlauf befindet, d.h. hohe Leitfähigkeiten der Schicht nahe des Innenleiters vorherrschen und hierdurch die Feldstärken deutlich begrenzt werden. Dies ist jedoch zwangsweise verbunden mit hohen Verlustleistungsdichten. Betrachtet man die Verlustleistungsdichte im Volumen der mikrovaristorgefüllten Beschichtung, welche in 10 mm Abstand zum Innenleiter erfasst wird, so ergeben sich für die unterschiedlichen modellierten Varianten die Werte gemäß Tabelle 4.3. Die Kennlinie mit  $E_b = 2$  kV/mm bewirkt in diesem Modell eindeutig eine deutlich zu hohe Verlustleistungsdichte. Der Wert von  $700$  W/m<sup>3</sup> ist im Dauerbetrieb inakzeptabel, dieser würde in der Praxis zu einer erheblichen Erwärmung des Isolators führen. Um den möglicherweise auftretenden Überspannungen und den Prüfpegeln der Anlagen gerecht zu werden (vgl. Tabelle 4.1), wird demzufolge eine Kennlinie mit höheren Schaltpunktfeldstärken benötigt.

Insgesamt ist klar erkennbar, dass die nichtlinear leitfähige Eigenschaft des mikro-

<sup>6</sup>Dies wurde auch anhand von Ergebnisausgaben des Betrags der elektrischen Feldstärke im Volumen der modellierten Schicht bestätigt.

varistorgefüllten Werkstoffs eine Verbesserung der tangentialen Feldverhältnisse im Sinne einer gleichmäßigeren Feldverteilung und geringerer Maximalfeldstärken ermöglicht. Im Bereich höherer elektrischer Feldstärken stellt sich im mikrovaristorgefüllten Werkstoff eine höhere Leitfähigkeit ein, hierdurch wird das stationäre Strömungsfeld entlang des Isolators in Richtung der Kapselung verdrängt.

Tabelle 4.3: Mittlere Verlustleistungsdichten der modellierten Schicht mit erhöhter Leitfähigkeit in 10 mm Abstand zum Innenleiter

Art der leitfähigen Volumenbeschichtung	Verlustleistungsdichte $p$
Konstant $10^{-14}$ S/m	0,06 W/m <sup>3</sup>
Mikrovaristorgefüllt, $E_b = 2$ kV/mm	700 W/m <sup>3</sup>
Mikrovaristorgefüllt, $E_b = 4$ kV/mm	65 W/m <sup>3</sup>
Mikrovaristorgefüllt, $E_b = 6$ kV/mm	25 W/m <sup>3</sup>
Mikrovaristorgefüllt, $E_b = 8$ kV/mm	18 W/m <sup>3</sup>

Außer Reichweite des Isolators liegt an der Oberfläche des Innenleiters eine elektrische Feldstärke von 4,92 kV/mm vor, dies stimmt mit der theoretischen Betrachtung unter Verwendung von Gleichung 4.1 für 600 kV überein. Anhand der Darstellung der elektrischen Feldstärke  $E$  in Abbildung 4.3 ist ersichtlich, dass in der mikrovaristorgefüllten Außenschicht des Isolators aufgrund der Feldverdrängung wesentlich geringere elektrische Feldstärken auftreten. Im Falle der Kennlinie mit  $E_b = 6$  kV/mm beträgt der Maximalwert 2,27 kV/mm. Betrachtet man nun die modellierten Kennlinien der Abbildung 4.1 für 6 kV/mm, so wird klar, dass die modellierte mikrovaristorgefüllte Schicht ausschließlich im unteren Bereich der dargestellten Kennlinie gesteuert wird. Dies ist bei der Auslegung durchaus gewünscht, da Reserven für auftretende Überspannungen vorgehalten werden müssen und die Kennlinie niemals den Bereich hoher Leitfähigkeiten erreichen soll. Auch sind die Verlustleistungsdichten mit 25 W/m<sup>3</sup> im Falle der 6 kV/mm Kennlinie und auch 65 W/m<sup>3</sup> im Falle der 4 kV/mm Kennlinie als akzeptabel zu werten, mit dem gleichzeitigen Effekt einer Verbesserung der Feldverhältnisse. Wenn zusätzlich Effekte der Temperaturabhängigkeit oder eine hohe Sicherheitsreserve für auftretende Überspannungen berücksichtigt werden müssen, könnte möglicherweise eine Kennlinie mit höherer Schaltpunktfeldstärke von 8 kV/mm oder mehr gewünscht sein.

### **Oberflächenaufladung und Ladungsabbau**

Der Aspekt der Aufladung der Oberflächen ist bei Gleichspannungs-Isoliersystemen von besonderem Interesse. Zieldefinition ist eine moderate Ansammlung von Oberflächenladungen an der Grenzfläche und ein rascher Abfluss von zusätzlichen Ladungsträgern, welche an Oberflächen akkumulieren können und im Folgenden mit dem Begriff *Störladungen* bezeichnet werden. Grundsätzlich ist die Ladungsansammlung an Grenzflächen (Gleichung 2.7) von den Feldverhältnissen und somit von der Geometrie und den Werkstoffeigenschaften abhängig. Im Falle von Polaritätswechseln geht die Umkehr der Polarität mit einer Änderung der Feldverteilung einher, durch einen raschen Abfluss der vorhandenen Ladungsträger könnten sich diese schnell der neuen Feldverteilung anpassen. Starken Überhöhungen in der elektrischen Feldverteilung würde somit effizient vorgebeugt werden.

Zur Untersuchung des Verhaltens wird ebenfalls ein FEM-Simulationsmodell erstellt. Zunächst wird die Aufladung der Grenzfläche bis zum Erreichen des stationären Zustandes des Modellisolators gemäß Abbildung 4.3 zeitabhängig elektroquasi-statisch (EQS) berechnet. Im EQS-Modus des Berechnungsprogramms werden sowohl die Leitfähigkeiten als auch die Permittitäten der Werkstoffe berücksichtigt. Der stationäre Zustand wird, bei einer erhöhten Leitfähigkeit der modellierten Schicht mit konstant  $10^{-12}$  S/m modelliert, nach etwa 100 s erreicht. Die Ansammlung der Oberflächenladung des zeitabhängig gerechneten Modells, welche über die Beziehung der Gleichung 2.7 an den verschiedenen Positionen der Grenzfläche ausgegeben wurde, ist für verschiedene Zeitpunkte  $t$  in Abbildung 4.5 über der radialen Position  $r$  der Isolatoroberfläche dargestellt, wobei bei  $t = 0$  s die Gleichspannung im Modell durch eine Sprungfunktion eingeschaltet wurde. Der Maximalwert der Ladungsträgerdichte nach 100 s beträgt  $32 \mu\text{C}/\text{m}^2$  und befindet sich in 10 mm radialem Abstand vom Innenleiter.

Das Modell dient der Veranschaulichung des Effekts der Oberflächenaufladung und der Auswirkung verschiedener Materialparameter auf deren Verteilung entlang der Oberfläche. Im Falle einer realen Isolator-Geometrie wird sich im stationären Zustand eine von Abbildung 4.5 abweichende Ladungsverteilung einstellen, bzw. es kann die Verteilung durch geeignete Geometrie des Isolators gezielt optimiert werden. Das Modell wurde auch mit niedrigeren, konstanten Leitfähigkeiten der Schicht berechnet. Dies führt zu einer identischen Verteilung der Ladungsträger im stationären Zustand,

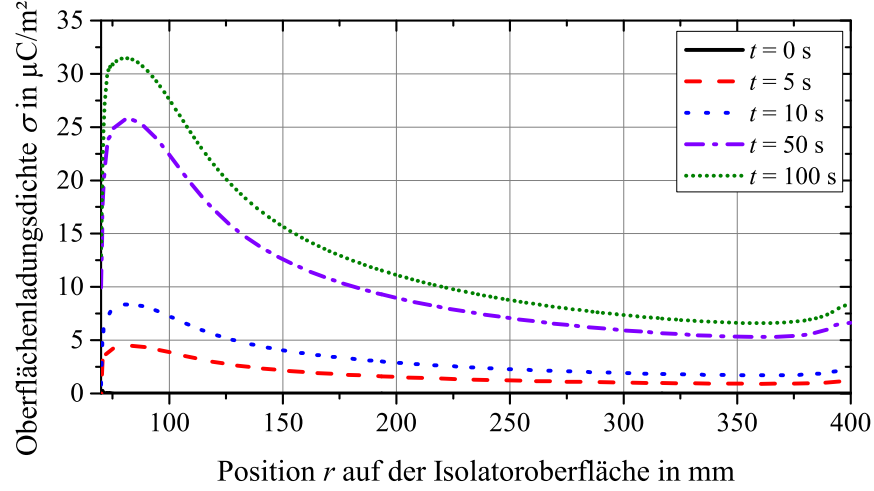


Abbildung 4.5: Ladungsaufbau bei einer konstanten Leitfähigkeit der Schicht von  $10^{-12}$  S/m: Dargestellt sind die Zeitpunkte 0 s, 5 s, 10 s, 50 s und der endgültige Aufladungszustand nach 100 s auf der konvexen Seite des Isolators.

jedoch zu deutlich längeren Zeitkonstanten bis zum Erreichen des stationären Zustandes. Wird hingegen eine nichtlinear leitfähige Kennlinie eines mikrovaristorgefüllten Polymers in der Außenschicht des Modell-Isolators appliziert (Schalt punktfeldstärke  $E_b = 6$  kV/mm, Kennlinie gemäß Abbildung 4.1), ergibt sich eine abweichende Ladungsverteilung zu der bei konstant angenommener Leitfähigkeit (vgl. Abbildung 4.6). Dies entspricht auch der Erwartung, da die elektrische Leitfähigkeit  $\kappa_{\text{Isol}}$  je nach Position am Isolator variiert und somit das Ergebnis von Gleichung 2.6 an der jeweiligen Position beeinflusst wird. Weiterhin werden die Werte der elektrischen Verschiebungsdichte (Gleichung 2.7) infolge der feldsteuernden Wirkung des nichtlinear leitfähigen Werkstoffs verändert, auch dies führt zu Veränderungen in der Oberflächenladungsdichte. Die Zeitdauer zum Erreichen des stationären Zustands beträgt bei  $E_b = 6$  kV/mm nur etwa 20 s. Das beschleunigte Erreichen des stationären Zustands liegt in der Nichtlinearität des Werkstoffs und der folglich lokal erhöhten Leitfähigkeit begründet.

Die nichtlinear angenommene Kennlinie ( $E_b = 6$  kV/mm) führt offenbar zu niedrigeren Oberflächenladungsdichten. Der Maximalwert beträgt  $25 \mu\text{C}/\text{m}^2$  und liegt somit etwa 20 % unter dem berechneten Maximalwert von  $32 \mu\text{C}/\text{m}^2$  bei konstant  $10^{-12}$  S/m Leitfähigkeit der Schicht. Das Maximum befindet sich im Falle der nichtlinear leitfähigen Schicht außerdem in einem größeren radialen Abstand (20 mm)

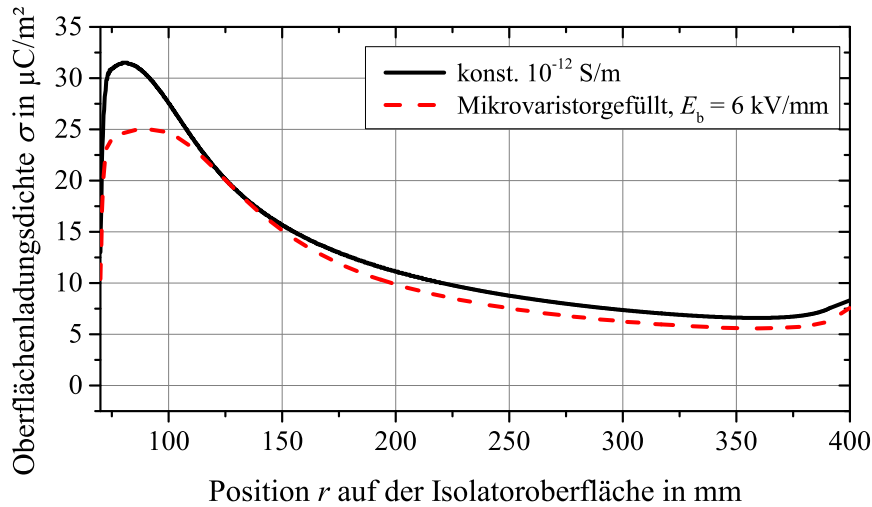


Abbildung 4.6: Stationärer Endzustand des Ladungsaufbaus bei einer mikrovaristorgefüllten Schicht mit  $E_b = 6 \text{ kV/mm}$ , dazu im Vergleich der stationäre Zustand bei einer konstanten Leitfähigkeit der Schicht von  $10^{-12} \text{ S/m}$

zum Innenleiter. Somit kann festgestellt werden, dass der hier modellierte nichtlinear leitfähige Werkstoff zu einer Reduzierung der Oberflächenladungsansammlung führt. Dieses Ergebnis korreliert offensichtlich mit dem Ergebnis der Verläufe der tangentialen Feldverteilung<sup>7</sup> (Abbildung 4.4).

Zur Betrachtung des Verhaltens von Störladungen wird das Modell derart modifiziert, dass Störladungsverteilungen künstlich aufgebracht werden können. Hierzu wird ein Multiphysik-Modell erstellt, welches zunächst elektrostatisch gelöst wird, um die gewünschte Störladungsverteilung über Randbedingungen im Modell aufzubringen. Anschließend wird, unter Verwendung der elektrostatischen Lösung als Startbedingung für den zweiten Löser, zeitabhängig im EQS-Modus weiter gerechnet, um das zeitliche Verhalten der Oberflächenladung am Isolator betrachten und gleichzeitig auch die Leitfähigkeit der involvierten Werkstoffe berücksichtigen zu können. Als Modell wird wieder ein konischer Schottisolator verwendet, allerdings mit kompakteren Abmessungen (Durchmesser der Kapselung: 500 mm, Durchmesser des Innenleiters: 120 mm). Hierzu wird im mittleren Bereich des Schottisolators eine aufgrund der 2D-axialsymmetrischen Modellierung bandförmige Störladungsvertei-

---

<sup>7</sup>Diese Korrelation deckt sich mit den Angaben der Literatur für nicht vernachlässigbare Leitfähigkeiten des Isolators, siehe Abschnitt 2.4.



lung in Form einer Gaußverteilung<sup>8</sup> aufgebracht. Die Störladungsdichte wird deutlich höher modelliert als die maximale Ladungsdichte an der Grenzfläche der vorherigen Berechnungen und zu  $400 \mu\text{C}/\text{m}^2$  festgelegt. Da die Leitfähigkeit  $\kappa_{\text{Schicht}}(E)$  der Schicht im Falle von nichtlinearen Kennlinien über dem Radius des Isolators infolge der Feldabhängigkeit variiert, gestaltet sich ein Vergleich zu konstant angenommenen Leitfähigkeiten schwierig. Als Ansatz zur Vergleichbarkeit wird wie folgt vorgegangen: Im nichtlinearen Modell wird die Leitfähigkeit (ohne die im Modell aufgebrachte Störladung) im mittleren Bereich des Isolators erfasst und diese Werte als konstante Leitfähigkeit für Vergleiche zugrunde gelegt. Für die mikrovaristorgefüllte Schicht mit  $E_b = 6 \text{ kV}/\text{mm}$  ergibt sich somit eine konstante Vergleichs-Leitfähigkeit von  $5,5 \cdot 10^{-12} \text{ S}/\text{m}$ . Die Spannung am Innenleiter beträgt  $U = 600 \text{ kV}$ .

Das Ergebnis dieser Berechnung (Abbildung 4.7) zeigt den Abfluss der modellierten Störladungsverteilung. Beim mikrovaristorgefüllten Polymer führt die Feldverzerrung im Bereich der Störladung zu einer lokalen Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit in diesem Bereich. Hierdurch wird, insbesondere in den ersten Sekunden der Berechnung mit maximaler Störladungsdichte und somit hoher lokaler Erhöhung der Leitfähigkeit, der Abfluss der Ladungsträger im Vergleich zur konstanten Leitfähigkeit von  $5,5 \cdot 10^{-12} \text{ S}/\text{m}$  deutlich beschleunigt. Nach 10 s ist das Maximum des nichtlinearen Modells ( $6 \text{ kV}/\text{mm}$ ) bereits fast halbiert. Im Falle von Polaritätswechseln wäre somit ein rascher Abfluss der Ladungsträger gewährleistet. Weiterhin ist festzustellen, dass der Maximalwert der Ladungsdichte im nichtlinearen Fall in Richtung des Innenleiters wandert. Dies ist in der in Richtung Innenleiter höheren Leitfähigkeit begründet.

Der beschleunigte Abbau vorhandener Oberflächenladungen für mikrovaristorgefüllte Polymere kann auch anhand einer homogenen Feldanordnung am Modell eines rotationssymmetrischen Stabisolators (vgl. Abbildung 4.8) in Berechnungen gezeigt werden. Berechnet wird hier eine Beschichtung mit nichtlinearer Kennlinie ( $E_b = 6 \text{ kV}/\text{mm}$ ) und die vergleichbare lineare Leitfähigkeit, im Falle dieses Modells  $\kappa_{\text{Schicht}} = 2,51 \cdot 10^{-11} \text{ S}/\text{m}$ . Die homogene Anordnung wird mit einer Feldstärke von  $40 \text{ kV}/\text{cm}$  beaufschlagt, das Isoliergas wird mit  $\kappa_{\text{Gas}} = 1 \cdot 10^{-20} \text{ S}/\text{m}$  modelliert, der Kern des zylindrischen Isolators mit  $\kappa_{\text{Isol}} = 1 \cdot 10^{-16} \text{ S}/\text{m}$ .

Durch die lokale Veränderung des elektrischen Feldes im Bereich der modellierten

---

<sup>8</sup>Als Parameter der Gaußverteilung zur Erstellung der Ladungsverteilung wurde  $\mu = 155 \text{ mm}$ ,  $\sigma = 5 \text{ mm}$  sowie ein Skalierungsfaktor  $\alpha = 0,005$  gewählt. Der Maximalwert von  $400 \mu\text{C}/\text{m}^2$  befindet sich somit bei  $r = 155 \text{ mm}$ , siehe auch Abbildung 4.7.

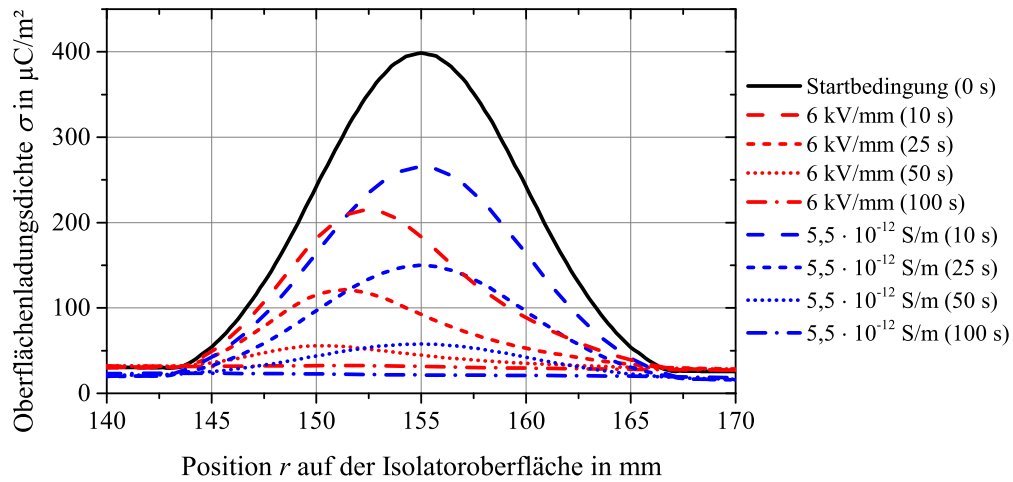


Abbildung 4.7: Ladungsabbau der modellierten Störladungsverteilung im Bereich um  $r = 155$  mm auf der Isolatoroberfläche. Dargestellt wird der Ladungsabbau für eine mikrovaristorgefüllte Schicht des Isolators mit  $E_b = 6$  kV/mm (rot) und für eine konstante Leitfähigkeit von  $5,5 \cdot 10^{-12}$  S/m, bei anliegender Spannung  $U = 600$  kV [Jan 2010].

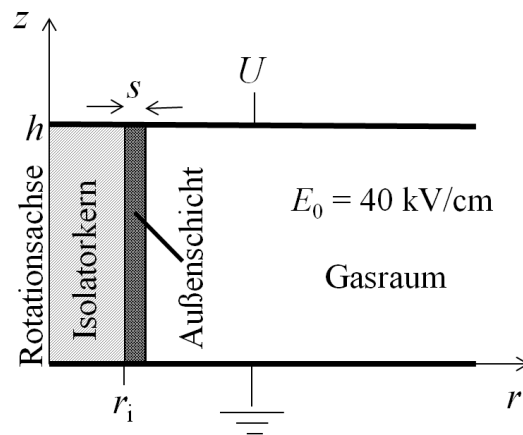


Abbildung 4.8: Darstellung des 2D-axialsymmetrischen Simulationsmodells eines zylindrischen Stabisolators [Win 2011].

Störladungen an der Oberfläche wird das mikrovaristorgefüllte Polymer lokal aussteuert<sup>9</sup> und beschleunigt somit den Abbau dieser Störladungen auch im Falle von Anordnungen mit homogener Feldverteilung (Abbildung 4.9). Wie die Berechnungen zeigen, fließen die Störladungen beim modellierten, mikrovaristorgefüllten Polymer innerhalb weniger Sekunden ab. Bei konventionellen Isolierwerkstoffen ohne angepasste Leitfähigkeit und ohne leitfähige Schicht würde dieser Vorgang Tage oder Wochen dauern. Dass eine lokale Aussteuerung mikrovaristorgefüllter Polymere auch in der Praxis tatsächlich stattfindet, wurde in Experimenten an mikrovaristorgefüllten Langstabisolatoren in [Deb 2015] nachgewiesen. Dort wurde die Vermeidung von Trockenzonenüberschlägen durch eine lokale Aussteuerung des mikrovaristorgefüllten Polymers festgestellt.

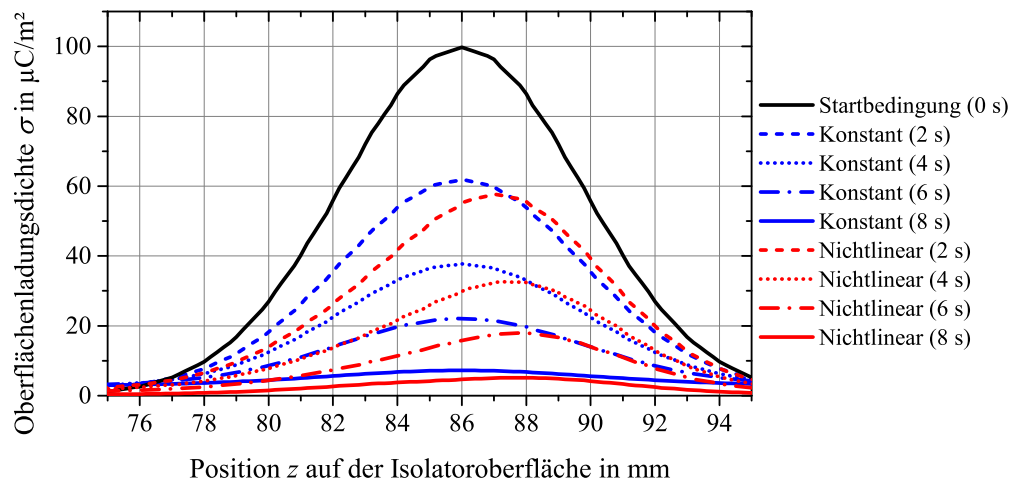


Abbildung 4.9: Vergleich des Oberflächenladungsabbaus einer im Modell aufgetragenen Störladung von  $100 \mu\text{C}/\text{m}^2$  für die beiden Fälle mikrovaristorgefüllt (rot) und konstant (blau) [Win 2011]

<sup>9</sup>Als lokale Aussteuerung ist eine Erhöhung der Leitfähigkeit in einem örtlich begrenzten Gebiet infolge einer lokal beschränkten Felderhöhung zu verstehen, ohne etwaige Erhöhung der Feldstärke der Gesamtanordnung.

### 4.3 Wunschparameter für mikrovaristorgefüllte Polymere

Anhand der orientierenden Berechnungen wird festgestellt, dass die Kennlinie eines mikrovaristorgefüllten Polymers für den Einsatz in Isolierwerkstoffen für DC-GIS eine Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  in der Größenordnung um 6 kV/mm aufweisen muss, im Detail abhängig von der genauen Auslegung der Anlage. Der Betriebspunkt bei dieser Anwendung muss deutlich unterhalb des Bereichs der Kennlinie mit hohen Stromdichten gewählt werden, um Reserven für Überspannungen vorzuhalten und akzeptable Verlustleistungsdichten einzuhalten. Insbesondere bei transienten Überspannungen könnte eine zu hohe Stromdichte negative Folgen haben, sofern dieser Bereich der Kennlinie auch in transienten Vorgängen zu einer sehr hohen Aussteuerung und somit zu hohen Leitfähigkeiten führt. Die Begrenzung der Überspannung infolge der Aussteuerung ist zwar prinzipiell vorteilhaft, eine zu hohe Aussteuerung kann aber zur Zerstörung des Bauteils führen. Eine nur moderate Nichtlinearität im unteren Bereich der  $E$ - $J$ -Kennlinie bewirkt dagegen positive Effekte in Bezug auf die Verteilung der Oberflächenaufladung und den Abbau von Störladungen und ist daher gewünscht.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Betrachtungen wurde an einen Hersteller der Wunsch nach Mikrovaristoren mit einer Schaltpunktfeldstärke von mindestens 6 kV/mm (eingemischt im polymeren Isolierwerkstoff) herangetragen, welche eine moderate Nichtlinearität der Kennlinie aufweisen. Weiterhin wurde für eine gute Verarbeitbarkeit und die Vermeidung von Sedimentation im Gießharz-Verguss eine geringe Partikelgröße gewünscht. Die Herstellung derartiger Mikrovaristoren konnte erfolgreich umgesetzt werden. Ergebnisse zu diesen mit Prototyp-Mikrovaristoren gefüllten Polymeren werden in Kapitel 7 detailliert dargestellt.

### 4.4 Wunschparameter für ATO-gefüllte Polymere

Neben Mikrovaristoren wird ein weiterer funktioneller Füllstoff für Untersuchungen herangezogen: Planare Glimmerpartikel mit nanoskaliger, antimondotierter Zinnoxidbeschichtung (ATO). Die Struktur der Partikel wurde bereits in Abschnitt 2.5.3 gezeigt.

Untersuchungsergebnisse, welche in [Rüg 2012b] und [Lan 2013] veröffentlicht wurden, zeigen ausschließlich Messergebnisse bei elektrischen Feldstärken unterhalb von 1 kV/mm. Aufgrund der Angabe eines relativ geringen Nichtlinearitätsexponenten der *Minatec SCM E12*<sup>®</sup> Partikel von etwa  $\alpha = 3$  [Lan 2013] wird angenommen, dass auch im Bereich höherer elektrischer Feldstärken mit diesen Partikeln eine definierte, geringe elektrische Leitfähigkeit erreicht werden kann. Wegen der benötigten, geringen elektrischen Leitfähigkeit werden ausschließlich Partikel des Typs *Minatec SCM E12*<sup>®</sup> verwendet und charakterisiert.

Gewünscht werden die folgenden Eigenschaften:

- Der Füllstoff sollte, eingemischt in Epoxidharz, eine moderate elektrische Leitfähigkeit in der Größenordnung  $10^{-12}$  -  $10^{-14}$  S/m ergeben.
- Die elektrische Leitfähigkeit sollte auch bei hohen Feldstärken (6 kV/mm und darüber) keine Werte erreichen, die zu einer deutlichen Erwärmung mit nennenswerten elektrischen Verlusten führt.
- Eine moderate Nichtlinearität ist wünschenswert, da hierdurch eine Feldsteuerung erreicht wird.
- Hohe Nichtlinearitätsexponenten sind hingegen nachteilig, da bei temporären Überspannungen oder transienten Vorgängen zu hohe Leitfähigkeiten erreicht werden könnten.
- Die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit sollte ebenfalls moderat sein. Auch eine Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur ermöglicht eine Feldsteuerung. Diese könnte beispielsweise im Bereich des heißen Innenleiters die auftretenden Maximalfeldstärken am Isolator reduzieren.
- Eine Kombination aus moderater Temperatur- und Feldstärkeabhängigkeit könnte sich insgesamt positiv auf die elektrische Feldverteilung auswirken. Es ist denkbar, dass die Temperaturabhängigkeit die auftretenden Feldstärken am heißen Innenleiter reduziert, während die Feldstärkeabhängigkeit im Bereich der Kapselung einer Feldinversion entgegenwirken könnte.

Zur Klärung der Annahmen und der tatsächlichen Parameter wird der Füllstoff des Typs *Minatec SCM E12*<sup>®</sup> für eine umfangreiche experimentelle Charakterisierung als Füllstoff in Epoxidharz-Prüflingen verwendet. Durch den Hersteller wurde signalisiert,

dass eine weitere Anhebung des elektrischen Widerstands derartiger Partikel generell möglich ist. Dies könnte für das Erzielen sehr geringer Verlustleistungsdichten oder für Isolieranordnungen mit sehr hohen Feldstärken wünschenswert sein.

# 5 Versuchsaufbauten und Messmethodik

Für die genaue Charakterisierung der funktionell gefüllten Isolierwerkstoffe werden geeignete Versuchsstände erstellt. Die im Folgenden dargestellten Prüfstände werden in zwei Kategorien unterteilt. Zuerst werden Prüfstände für grundsätzliche Untersuchungen des Kurz- und Langzeitverhaltens an Werkstoffproben bei Gleichspannungsbeanspruchung vorgestellt. Anschließend wird ein Versuchsaufbau zur Untersuchung an Geometrien mit realen Abmessungen und Spannungshöhen für Prüfungen an produktnahen Isolatoren für Hochspannungs-Gleichstrom-Isoliersysteme erläutert.

## 5.1 Versuchsaufbauten für die Charakterisierung von Werkstoffproben

### 5.1.1 Versuchsstand zur Kennliniencharakterisierung

#### Aufbau

Die Aufgabe dieses Versuchsstandes ist es, die  $E$ - $J$ -Kennlinie unter definierten Bedingungen zu bestimmen. Hierzu werden die in den Versuchen gemessenen Größen Spannung  $U$  und Strom  $I$  in geometrieunabhängige Größen, Feldstärke  $E$  und Stromdichte  $J$ , übertragen. Dies erfolgt durch Division der Spannung  $U$  durch die Prüflingsdicke sowie des Stroms  $I$  durch die Elektrodenfläche. Der Fokus liegt hier insbesondere auf der Ermittlung der Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$ , welche neben der elektrischen Feldstärke  $E$  primär von der Temperatur  $\vartheta$  sowie vom Feuchtegehalt des

Prüflings abhängig ist. Aus diesem Grund wird der Prüfling in einem evakuierbaren Temperaturschrank des Typs *Thermo Scientific VT 6060 M* bei definierten Temperaturen vermessen. Sämtliche Prüflinge werden außerdem im Vorfeld im Vakuumschrank bei einer Temperatur von 115 °C getrocknet und über Nacht bei Vakuum ( $<1$  mbar (abs.)) gelagert, um einen Einfluss von Feuchte im Isolierwerkstoff ausschließen zu können. Ergänzend wird in den Temperaturschränken ein Trockenmittel auf Silica-Basis eingesetzt. Die Prüfspannung wird über eine Hochspannungs-Durchführung in den Temperaturschrank geleitet, eine Messleitungsdurchführung ermöglicht die Ausleitung der niederspannungsseitigen Elektrode und hierdurch eine Messung des Ableitstroms durch das Volumen des Prüflings. Der Versuchsstand gemäß dem Ersatzschaltbild in Abbildung 5.1 wird von einem PC unter Verwendung der Mess- und Steuersoftware *LabVIEW* der Firma *National Instruments* gesteuert und ausgewertet. Hierzu wird die Multifunktions-Datenerfassungskarte *NI PCI-6221* mit zugehörigem Anschlussblock *NI SCB-68* verwendet. Für die Erzeugung einer normgerechten Gleichspannung wird eine Gleichspannungsquelle<sup>1</sup> verwendet, welche Prüfspannungen bis zu 20 kV mit einem Welligkeitsfaktor von  $<1\%$  sowie eine Spannungsstabilität im Bereich  $<\pm 3\%$  aufweist, gemäß [IEC 60060-1]. Die Gleichspannungsquelle verfügt über einen Steuereingang, so dass über das Programm eine Steuerspannung in Form einer 50-Hz-Wechselspannung zwischen 0 V und 10 V das Einstellen der Gleichspannung zwischen 0 V und 20 kV ermöglicht. Die Prüfspannung wird mittels eines Hochspannungstastkopfs, Typ *Tektronix P6015A* mit einem Teilerverhältnis von 1000:1 gemessen. Die niederspannungsseitige Elektrode des Prüflings wird über eine Messleitungsdurchführung aus dem Temperaturschrank heraus geleitet. Zwischen dieser Ausleitung und Erde wird ein Picoampèremeter, Typ *Keithley Picoammeter 6485*, in Serie geschaltet. Dieses ermöglicht die Messung des Stromflusses durch den Prüfling im Messbereich für Ströme zwischen 20 fA und 20 mA und ist über eine digitale Schnittstelle durch *LabVIEW* direkt auslesbar. Die Messunsicherheit beträgt, abhängig vom Messbereich, höchstens  $\pm 0,4\%$ .

---

<sup>1</sup>Es handelt sich hierbei um eine eigens für diesen Versuchsstand konstruierte Gleichspannungsquelle in Form einer hochfrequenten Greinacher-Vervielfachungsschaltung, mit freundlicher Unterstützung von Herrn Dr. Thomas Wietoska, Laborleiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik, Technische Universität Darmstadt.



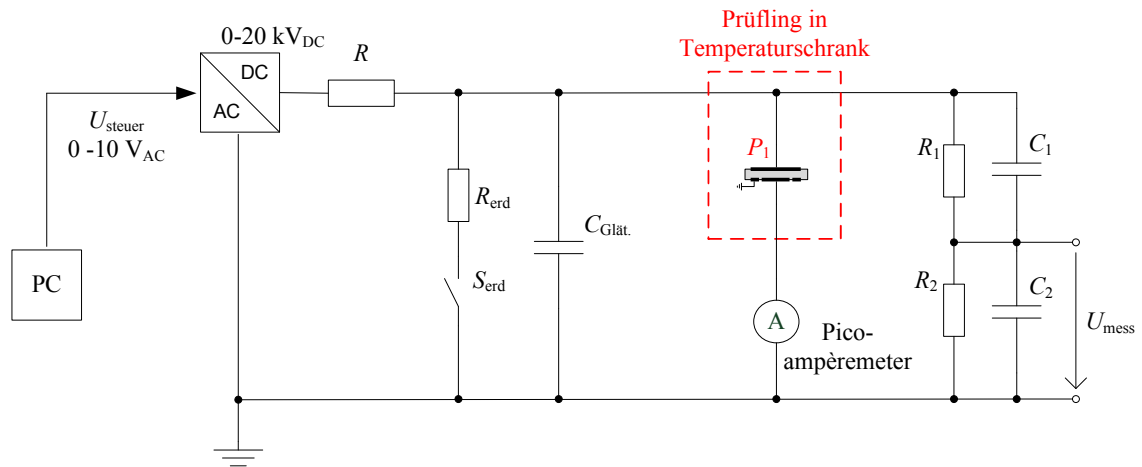


Abbildung 5.1: Elektrisches Ersatzschaltbild des Versuchsstandes zur Kennliniencharakterisierung von Isolierwerkstoffprüflingen bei Gleichspannungsbeanspruchung. Der im Ersatzschaltbild dargestellte Prüfling, welcher mit geschützten Elektroden zur Volumenleitfähigkeitsbestimmung gemäß [IEC 60093] kontaktiert wird, ist im Abschnitt 6.2.1 erläutert.

### Vorgehensweise zur Kennlinienerstellung

Nachdem der Prüfling entsprechend dem vorhergegangenen Abschnitt vorbereitet und im Temperaturschrank platziert wurde, wird nach dem Erreichen der Prüftemperatur mindestens weitere 60 Minuten gewartet. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass die Temperatur im Temperaturschrank und insbesondere am Prüfling stabilisiert ist. Zusätzlich wird die Temperatur unmittelbar am Prüfling durch einen Temperatursensor, welcher in den Messingelektroden des Prüfstandes eingebracht ist, gemessen und im Computerprogramm ständig protokolliert. Zur Erstellung der  $E$ - $J$ -Kennlinie müssen mehrere Spannungsstufen angefahren und gehalten werden und zu den jeweiligen Stufen der Strom, der durch den Prüfling fließt, gemessen werden. Um definierte Spannungsstufen anzufahren, wird die Ansteuerung der Spannungsquelle und somit das Anfahren und die Regelung der gewünschten Spannungsniveaus PC-gesteuert über ein *LabVIEW*-Programm umgesetzt. Das Programm übernimmt zudem auch das digitale Auslesen der Messdaten des Picoampèremeters über eine fest definierte Zeitspanne  $\Delta t$ . Nachdem die gewünschte Spannungsstufe eines Kennlinienpunktes durch das Programm angefahren und innerhalb von drei Sekunden auf einen stabilen Wert geregelt wurde, erfolgt über eine Zeitdauer von fünf Sekunden die Messung von insgesamt 50 Stromwerten. Hieraus wird ein Mittelwert gebildet und anschließend die darauffolgende Spannungsstufe durch das Programm angefahren. Die so

gewonnenen Messwerte werden um die oberen und unteren 5 % beschnitten, um Messausreißer auszufiltern. Die verbleibenden Werte werden gemittelt. Nach jeder Messung wird der Prüfling mindestens so lange kurzgeschlossen, bis der Entladestrom vollständig abgeklungen ist, um eventuell vorhandene Polarisierungseffekte für Folge-messungen zu eliminieren. Anhand des Temperatursensors in der Messingelektrode des Versuchsstandes wird vor weiteren Messungen außerdem überprüft, ob infolge der vorhergegangenen Messung eine Erwärmung aufgrund des Prüfstroms stattgefunden hat.

### 5.1.2 Versuchsstand zur Charakterisierung des Langzeitverhaltens

Nach der Kennlinien-Charakterisierung von neuen Werkstoffen muss auch insbesondere deren Langzeitverhalten bei Gleichspannungsbeanspruchung untersucht werden. Unter Alterung von konventionellen Isolierwerkstoffen versteht man die irreversible Veränderung der Eigenschaften, insbesondere die Reduktion der elektrischen Durchschlagfestigkeit, der mechanischen Festigkeit sowie der Widerstandsfähigkeit zur thermischen Alterung [Cig 2012b]. Eine Veränderung dieser Eigenschaften spiegelt sich in abweichenden physikalischen Eigenschaften wieder. Als zentrale physikalische Eigenschaft von Isolierwerkstoffen für Gleichspannungsanwendungen wird in diesem Langzeitversuch die Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa$  bei kombinierter elektrischer und thermischer Beanspruchung betrachtet. Irreversible Änderungen, welche durch das elektrische Feld hervorgerufen werden, bezeichnet man als Feldalterung. Durch eine elektrothermische Alterung werden chemische Prozesse, welche während der Feldalterung vonstatten gehen, beschleunigt [Kah 1989]. Im speziellen Falle der hier untersuchten, funktionell gefüllten Isolierwerkstoffe sind insbesondere auch etwaige Veränderungen in der elektrischen Leitfähigkeit zu betrachten. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit existieren noch keine Vorschriften zur Alterungsprüfung von Isolierwerkstoffen für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung. Aufgrund der verwendeten halbleitenden Füllstoffe auf Zinkoxidbasis wird in Anlehnung an die Prüfvorschrift für eine zeitraffende Alterungsprüfung für ZnO-Überspannungsableiter die Versuchsdauer auf 1000 Stunden festgelegt (vgl. [IEC 60099-4], Abschnitt 8.5.2). Dort wird eine Umgebungstemperatur von  $115\text{ °C} \pm 4\text{ °C}$  gefordert, sowie eine kontinuierliche Messung der Verlustleistung. Einige Parameter der Normprüfung für

Überspannungsableiter, insbesondere auch das Ausfallkriterium, lassen sich nicht auf Isolierwerkstoffe bei Gleichspannungsbeanspruchung übertragen. So werden die Prüftemperaturen der Langzeitprüfung zu 30 °C, 60 °C und 100 °C gewählt, um realitätsnahe Bedingungen nachzubilden, gleichzeitig aber auch einen ausreichenden Abstand zur Glasübergangstemperatur des Werkstoffs ( $T_G \approx 130\text{ °C}$ ) einzuhalten. Anstelle der Verlustleistung wird die Leitungsstromdichte  $J$  kontinuierlich gemessen. Für einen Werkstoff mit stabilen elektrischen Gleichspannungseigenschaften sollte die Leitfähigkeit  $\kappa$ , und somit auch die gemessene Leitungsstromdichte  $J$ , über die gesamte Prüfdauer möglichst konstant sein oder sogar leicht abnehmen, auf keinen Fall jedoch zunehmen. In jüngster Vergangenheit (Juni 2014) wurde eine Prüfvorschrift für Überspannungsableiter auf ZnO-Basis für HGÜ-Umrichterstationen in der Norm [IEC 60099-9] veröffentlicht, welche einen Prüfzyklus über 1000 Stunden mit vier Polaritätswechseln vorschreibt (nach 24 Stunden, 72 Stunden, 168 Stunden und 360 Stunden).

Es wird ein vollautomatisierter Versuchsstand für die Durchführung von Versuchen mit einer geplanten Versuchsdauer von 1000 Stunden entwickelt, aufgebaut und eingesetzt. Bei den Versuchen werden die Prüflinge einer kombinierten elektrischen und thermischen Beanspruchung ausgesetzt. Es können gleichzeitig 15 Prüflinge bei drei verschiedenen Temperaturen untersucht werden. Alle Prüflinge werden mit derselben Prüfspannung aus einer gemeinsamen Spannungsquelle beaufschlagt. Eine Variation der Prüf-Feldstärke ist allerdings durch verschiedene Dicken der Prüflinge möglich. Während der gesamten Prüfdauer werden an jedem Prüfling Strom und Spannung aufgezeichnet. Weiterhin werden Temperatur und relative Luftfeuchte in jeder Prüfkammer kontinuierlich erfasst. Um möglichst ausfallfreie Versuchsabläufe zu gewährleisten, wird eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) eingesetzt. Diese gewährleistet im Falle eines Stromausfalls eine Überbrückung von Ausfalldauern bis zu 30 Minuten. Während einer Überbrückungsphase werden sowohl die Prüfspannungserzeugung als auch sämtliche Messgeräte weiter versorgt, lediglich die Temperaturschränke werden aufgrund ihrer hohen Leistungsaufnahme nicht über die USV weiterbetrieben. Der Versuchsstand (Abbildung 5.2) besteht aus drei Prüfkammern in Form von Temperaturschränken des Typs *Binder FED 115*, welche mit elektrischen Durchführungen und Messleitungsdurchführungen ausgestattet sind. Die Prüflinge werden in den Temperaturschränken durch Elektrodenanodnungen mit

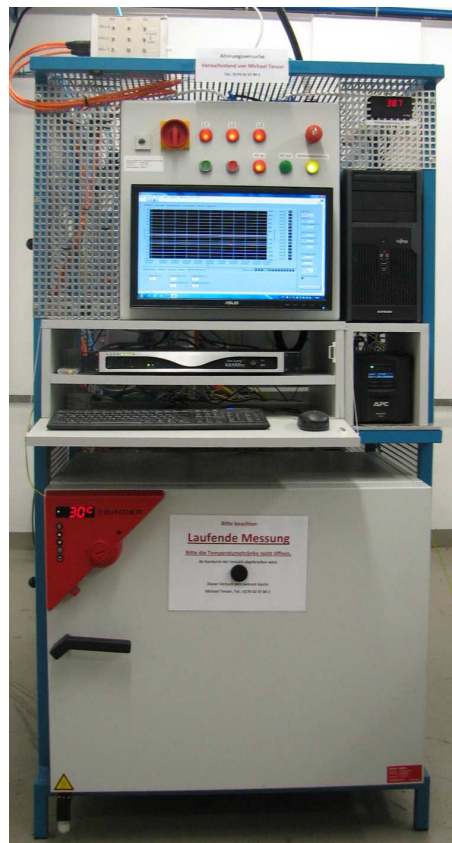


Abbildung 5.2: Foto des erstellten, vollautomatisierten Versuchsaufbaus in der Frontansicht. Oben die Bedieneinheit mit Mess- und Steuer-PC & USV, unten einer der drei Temperaturschränke. Auf der Rückseite der Anlage befinden sich zwei weitere Temperaturschränke.

Federkontakten fixiert (Abbildung 5.3)<sup>2</sup>. Die Mess- und Steuersoftware *LabVIEW* der Firma *National Instruments* und die Multifunktions-Datenerfassungskarte *NI PCI-6221* mit zugehörigen Anschlussblock *NI SCB-68* werden für Ansteuerung und Messung verwendet. Sowohl die Temperaturschränke als auch das verwendete Picoampèremeter sind für die Ansteuerung und Auslesung mittels *LabVIEW* werkseitig ausgestattet, und es wurden entsprechende Programme in Form von *Virtual Instruments*, kurz *VI*s für *LabVIEW* mitgeliefert.

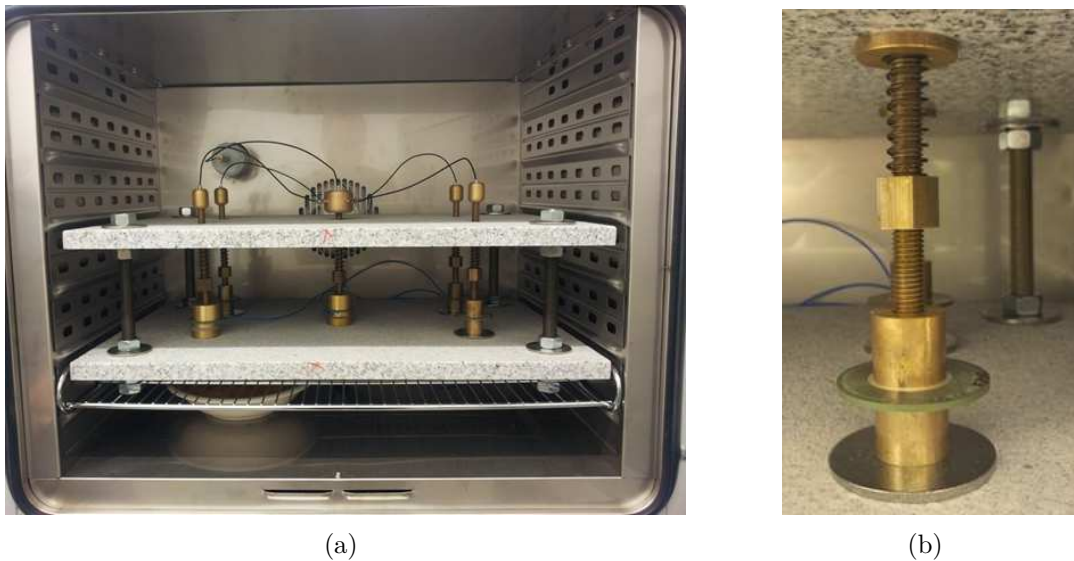


Abbildung 5.3: (a) Innenansicht eines Temperaturschranks des Versuchszustandes zur Untersuchung des Langzeitverhaltens mit fünf Prüflingsaufnahmen aus Messing, zwischen Granitplatten positioniert; (b) Prüflingsaufnahme mit eingespanntem mikrovaristorgefülltem Prüfling. Die Federkonstruktion dient einer definierten Anpresskraft und gesicherten Kontaktierung.

Für die Erzeugung der Prüf-Gleichspannung wird durch das Programm über einen Analogausgang der *NI PCI-6221* eine sinusförmige 50-Hz-Wechselspannung zwischen 0 V und 10 V (eff.) erzeugt, welche anschließend über eine Digitalendstufe des Typs *the t-amp D3400* (maximal 2·1800 W) verstärkt wird. Die Ausgangsspannung beträgt bis zu 60 V. Der nachgeschaltete Transformator, Typ *Wickeltechnik Langer* transformiert den Verstärkerausgang auf bis zu  $U_{\text{eff}} = 10 \text{ kV}$  bei  $S_{\text{max}} = 800 \text{ VA}$ . Hochspannungsseitig schließt sich nun ein pneumatischer Wechselschalter an, welcher via Mikrocontroller über das Programm angesteuert wird. Dies ermöglicht ein Umschalten zwischen

<sup>2</sup>Die Art der Kontaktierung ist von den verwendeten Prüflingen abhängig und wird im Zusammenhang mit den Messergebnissen erläutert.

zwei Gleichrichterventilen für eine Einweggleichrichtung auf positive bzw. negative Gleichspannung. Zur Glättung der Gleichspannung wird ein Kondensator mit einer Kapazität  $C = 705 \text{ nF}$  verwendet. Für die Dimensionierung der Glättungskapazität wurde zugrunde gelegt, dass über die insgesamt 15 Prüflinge und den Spannungsteiler ein maximaler Gesamtstrom  $I_{\text{max}} = 15 \text{ mA}$  fließen darf, um der Forderung des maximalen Welligkeitsfaktors von 3 % gemäß [IEC 60060-1] gerecht zu werden. Diese Dimensionierung beinhaltet eine große Sicherheitsmarge. Im Allgemeinen ist der Gesamtprüfstrom wesentlich geringer, der Welligkeitsfaktor beträgt in der Praxis daher  $< 1 \text{ %}$ .

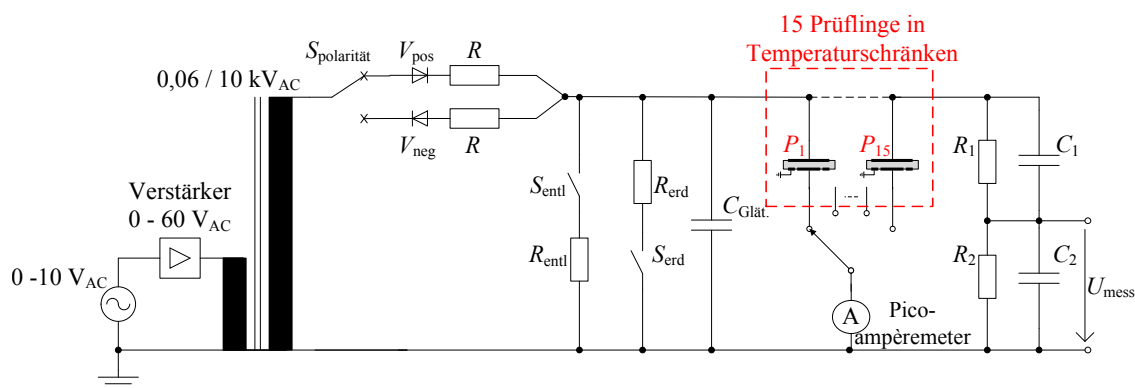


Abbildung 5.4: Elektrisches Ersatzschaltbild des Versuchsstands zur Untersuchung des Langzeitverhaltens von Isolierwerkstoffprüflingen bei Gleichspannungsbeanspruchung. Der im Ersatzschaltbild dargestellte Prüfling, welcher mit geschützten Elektroden zur Volumenleitfähigkeitsbestimmung kontaktiert wird, ist im Abschnitt 6.2.1 erläutert.

Das Programm zur Ansteuerung des Versuchsstandes (vgl. Flussdiagramm gemäß Abbildung 5.5) ist nach dem Prinzip eines Zustandsautomaten strukturiert. Zum Start des Programms werden zunächst alle angeschlossenen Komponenten (Temperaturschränke, Picoampèremeter) initialisiert. Nach Eingabe der gewünschten Parameter Prüfspannung, Polaritätswechsel und Temperaturen und dem Start der Messung durch den Benutzer wird die gewählte Prüfspannung durch Ausgabe eines Steuersignals angefahren. Die Regelung erfolgt über die Eingangsgröße der hochspannungsseitig gemessenen Prüf-Gleichspannung. Nach dem Erreichen der Sollspannung wird kontinuierlich der Strom  $I$  eines Prüflings über eine vorher festgelegte Zeitspanne gemessen und gemeinsam mit Spannung, Temperatur und Feuchte protokolliert. Nach dieser Zeitspanne wird der Kanal der Strommessung auf den nächsten Prüfling geschaltet. Parallel wird die Prüfspannung ständig geregelt und konstant gehalten. Bei

einem bevorstehenden Polaritätswechsel setzt das Programm das Spannungssignal zu Null und aktiviert über den Schalter  $S_{\text{entl}}$  einen Entladewiderstand zum Entladen der Kapazität  $C_{\text{Glät}}$  (vgl. Ersatzschaltbild in Abbildung 5.4). Sobald die Spannung über der Kapazität  $C_{\text{Glät}}$  unter einen Wert von 50 V abgefallen ist, wird über den Schalter  $S_{\text{polarität}}$  das Gleichrichtungsventil umgeschaltet, der Schalter  $S_{\text{entl}}$  geöffnet und die Steuerspannung sowie die Spannungsregelung aktiviert.

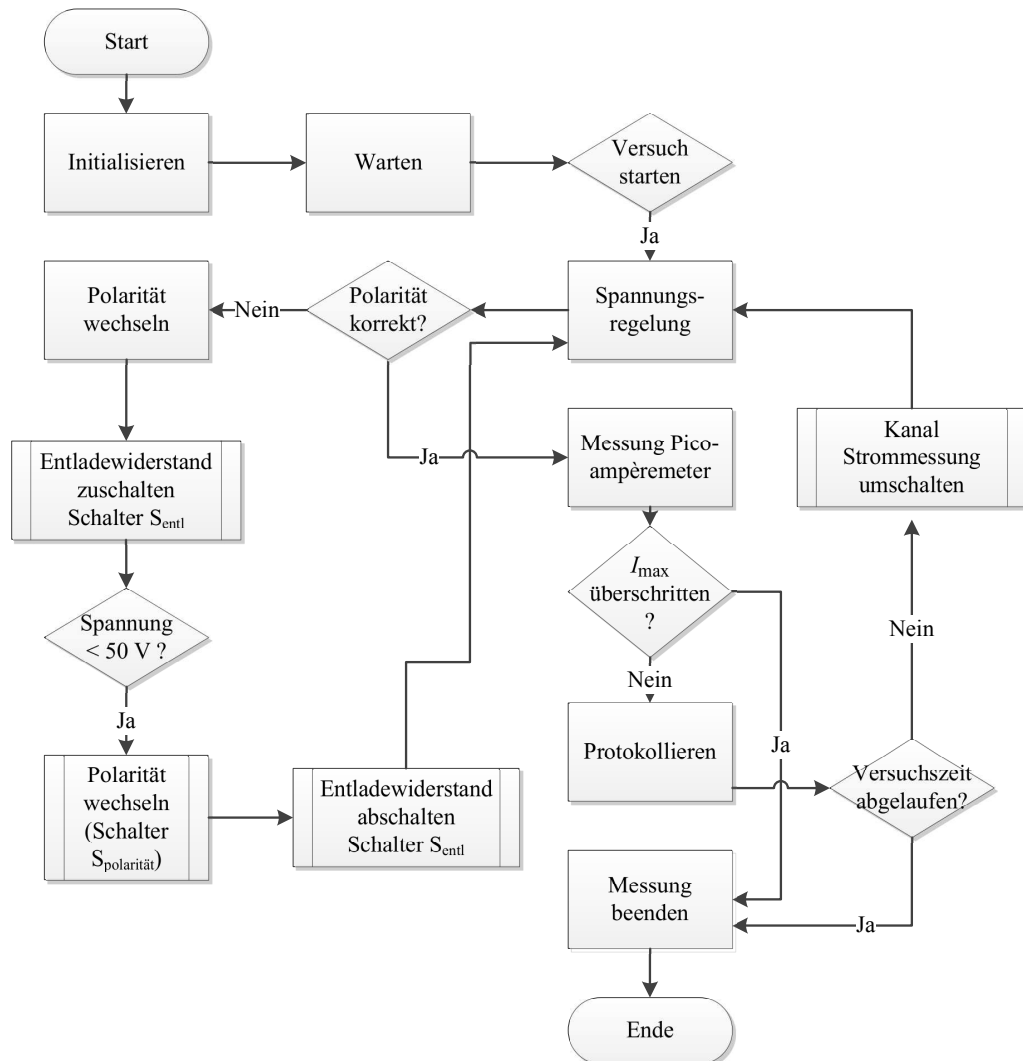


Abbildung 5.5: Flussdiagramm zur Ansteuerung, Messung und Regelung des Versuchszustandes zur Untersuchung des Langzeitverhaltens

## 5.2 500-kV-Versuchsaufbau für Hochspannungsuntersuchungen

Die zuvor an Werkstoffproben gewonnenen Erkenntnisse müssen an Prüflingen mit produktnahen Abmessungen und unter realitätsnahen Bedingungen in einem gekapselten Hochspannungs-Versuchsaufbau unter SF<sub>6</sub>-Atmosphäre validiert werden. Hierzu wird ein Prüfaufbau aus Komponenten von gasisolierten Schaltanlagen realisiert. Als Prüfkammer wird hierbei ein Kreuzbaustein einer serienmäßigen GIS der Firma *Siemens* mit angeflanschem Verlängerungsbaustein verwendet. Die Prüfspannung wird mittels einer Freiluft-SF<sub>6</sub>-Hochspannungsdurchführung in die Prüfkammer geleitet. Die Hochspannungsdurchführung ist bemessen für Prüfspannungen bis 500 kV (DC) und Impulsspannungen bis 1050 kV (Schaltstoß) bzw. 1425 kV (Blitzstoß). Durch einen gasdichten Schottisolator sind Prüfkammer und Hochspannungsdurchführung in zwei funktionale Gasräume getrennt. Die Prüfkammer wird mit einer 10-poligen Messleitungsdurchführung ausgestattet, welche zum einen zur niederspannungsseitigen Ausleitung am Prüfling zwecks Strommessung und zum anderen zur Ansteuerung des Prüflings-Wechselmagazins verwendet wird. Der gesamte Prüfaufbau ist für Betriebsdrücke von bis zu 0,8 MPa ausgelegt.

Für Gleichspannungsprüfungen wird gemäß Abbildung 5.6 ein 200-kV-Wechselspannungs-Prüftransformator über einen vorgeschalteten Stelltransformator aus dem 230-V-Netz gespeist. Über eine Greinacher-Verdopplungsschaltung der Firma *Haefely* wird diese auf eine Gleichspannung von bis zu 450 kV gewandelt. Zur Begrenzung des Kurzschlussstroms im Falle eines elektrischen Durchschlags wird zwischen dem Ausgang der Verdopplungsschaltung und der Hochspannungsdurchführung des GIS-Prüfaufbaus ein hochspannungsfester Vorwiderstand  $R_V \approx 1 \text{ M}\Omega$  geschaltet. Die Prüfgleichspannung wird mittels eines Hochspannungsteilers des Typs *Haefely HDC-600* ( $R_1 = 1000 \text{ M}\Omega$ ,  $C_1 = 3000/8 \text{ pF}$ ,  $R_2 = 4 \text{ k}\Omega$ ,  $C_2 = 8 \text{ nF}$ ) mit angeschlossenem AC/DC Peak Voltmeter, Typ *Highvolt MU17* gemessen.

Für die Prüfung mit Impulsspannungen wird ein 16-stufiger Marx-Generator mit 3,2 MV Summenladespannung, der Firma *Haefely* mit DKD-kalibriertem Prüf- und Messsystem der Firma *Highvolt* verwendet.

Aufgrund des notwendigen Gashandlings für den Austausch der Prüflinge im Versuchsaufbau und der damit verbundenen Zeitdauer wird ein Prüflings-Wechselmagazin



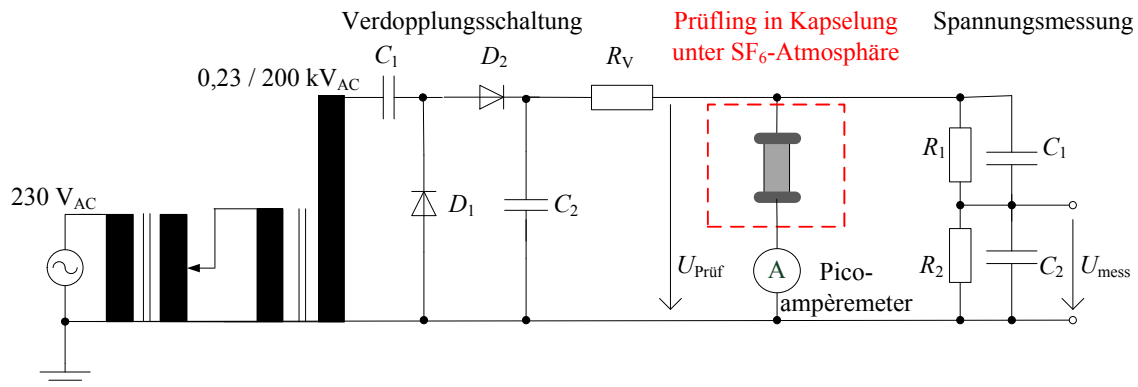


Abbildung 5.6: Elektrisches Ersatzschaltbild des gasisolierten Versuchsaufbaus für Hochspannungs-Gleichspannungsversuche bis 500 kV

konstruiert und in den Prüfkessel eingebaut (Abbildung 5.7). Hierdurch können bis zu vier zylindrische Prüflinge mit einer Höhe von bis zu 150 mm gleichzeitig in den Prüfkessel eingebracht und nacheinander geprüft werden.

Die Zylinder befinden sich auf einer Drehscheibe, welche durch einen elektrischen Schwenkantrieb rotiert wird. Über einen Linearantrieb mit Kolbenstange werden die Prüflinge vertikal angehoben und an die Hochspannungselektrode des Prüfaufbaus gefahren. Der Teller der Kolbenstange ist mit der niederspannungsseitigen Elektrode des Prüflings elektrisch verbunden, aber gegen den Linearantrieb elektrisch isoliert. Über eine Messleitung und eine Messleitungsdurchführung wird der Strom niederspannungsseitig aus dem Aufbau herausgeleitet. Dies ermöglicht eine Strommessung mittels Picoampèremeter, welches durch eine Schutzbeschaltung<sup>3</sup> vor Überspannungen geschützt wird. Um eine Beeinflussung der gelagerten Prüflinge während einer Prüfung zu vermeiden, insbesondere deren elektrostatische Aufladung, werden diese durch eine metallische Abdeckung auf Erdpotential im feldfreien Raum aufbewahrt.

Durch ein druckfestes Schauglas aus Zink-Selenid (ZnSe), welches stirnseitig am Verlängerungsbaustein eingebaut ist (vgl. Abbildung 5.7) und im Infrarot-Spektrum transmittiv ist, werden Infrarot-Thermografien während der elektrischen Messungen ermöglicht. Zur Vermeidung von Reflexionen während der Infrarot-Thermografien sind im Prüfaufbau sämtliche Aufbauten aus Aluminium mit mattschwarzer Farbe lackiert. Durch die hohe thermische Auflösung der verwendeten Wärmebildkamera *Infratec*

<sup>3</sup>Eine Beeinflussung der Messung des Picoampèremeters infolge der Schutzbeschaltung wurde durch Vergleichsmessungen ausgeschlossen.

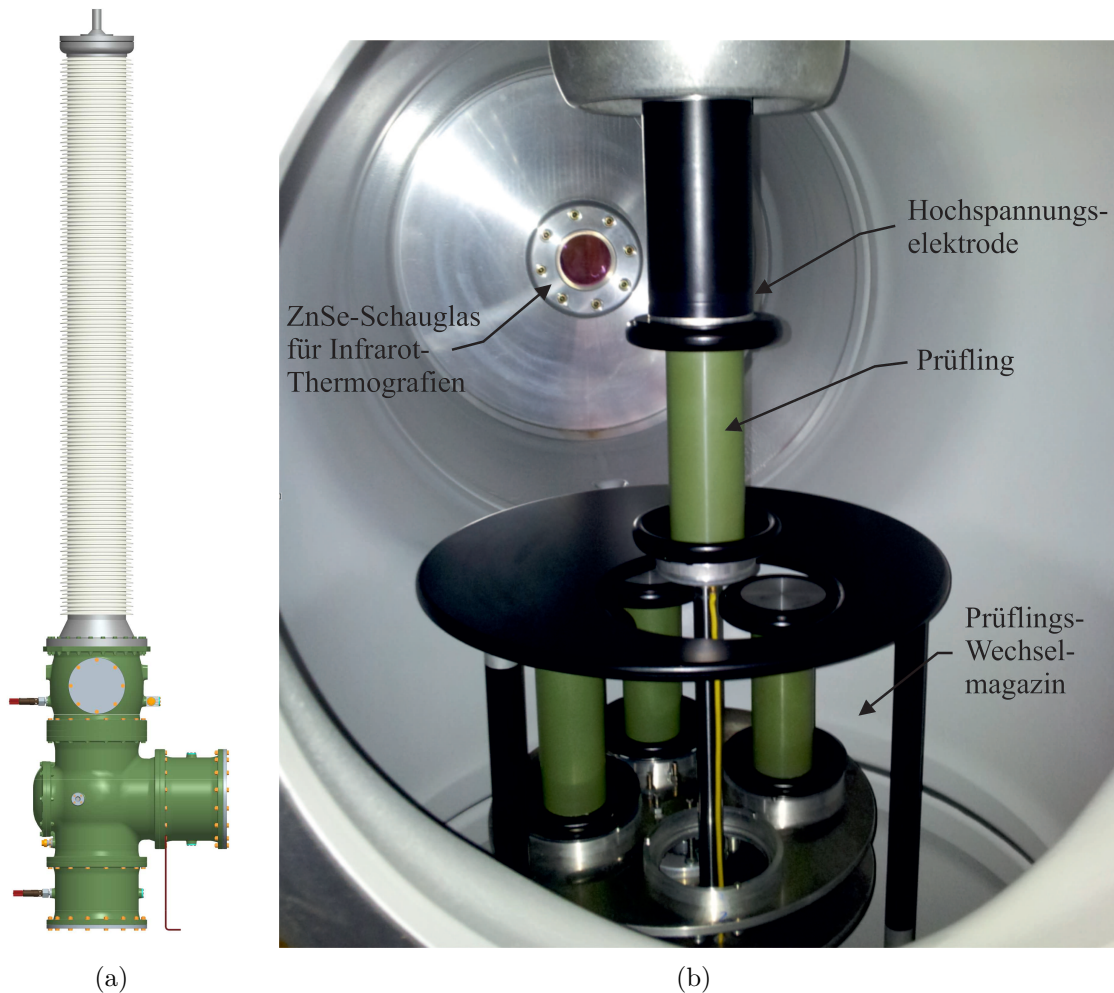


Abbildung 5.7: (a) CAD-Zeichnung des verwendeten Hochspannungs-Versuchsaufbaus, bestehend aus einer Freiluft-Gas-Durchführung sowie verschiedene GIS-Modulen als Prüfbehälter, dimensioniert für Prüfpegel bis 500 kV (DC) und 1425 kV Blitzstoßspannungsprüfung (mit freundlicher Genehmigung der *Siemens AG* Erlangen); (b) Blick in den Prüfkessel des gasisolierten Versuchsaufbaus mit eingebautem Prüflings-Wechselmagazin und zylindrischen Prüflingen für Hochspannungsversuche (grün).

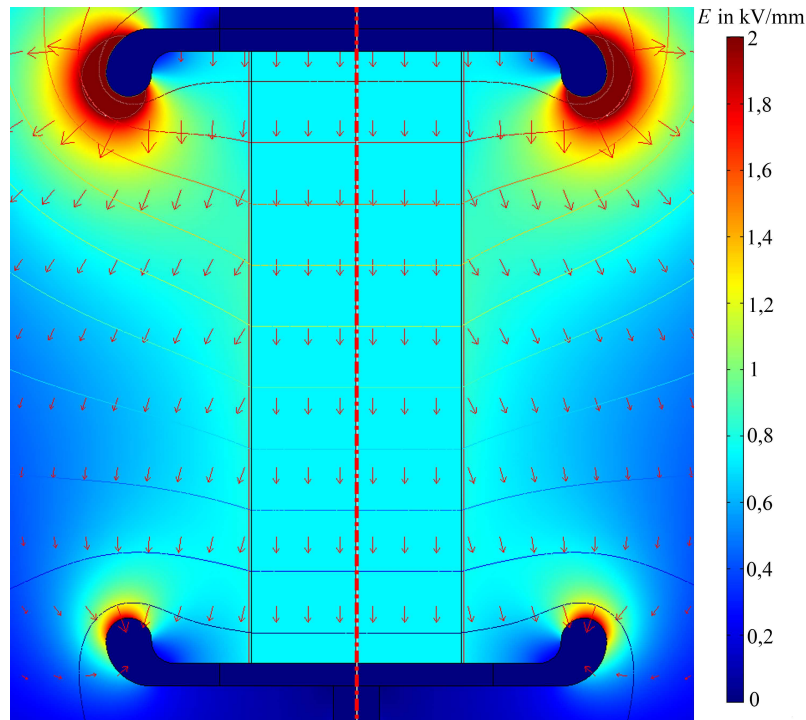


Abbildung 5.8: Simulationsergebnis der Feldverhältnisse am Hochspannungs-Prüfling, eingebettet in Elektrodenschalen, berechnet als stationäres Strömungsfeld mit folgenden Parametern: Leitfähigkeit des Isolators  $\kappa_{\text{Isol}} = 10^{-14} \text{ S/m}$ , Leitfähigkeit des Isoliergases  $\kappa_{\text{Gas}} = 10^{-18} \text{ S/m}$ , Potential  $\Phi = 100 \text{ kV}$  an der Hochspannungselektrode, Potential  $\Phi = 0 \text{ V}$  an der niederspannungsseitigen Elektrode. Dargestellt sind der Betrag der elektrischen Feldstärke  $E$  als Flächenfüllung, der Verlauf der Äquipotentiallinien sowie die vektorielle Darstellung des Verlaufs der Feldlinien (Pfeile).

*Variocam hr head 600* sind bereits kleinste Temperaturunterschiede messbar. Somit kann neben der elektrischen Messung auch optisch eine Aussage über auftretende Verlustleistungen an den Prüflingen und insbesondere über deren Position getroffen werden.

Abbildung 5.8 zeigt den Ergebnisplot einer Feldberechnung der Prüflingsanordnung mit Elektroden bei Gleichspannungsbeanspruchung ( $U = 100 \text{ kV}$ ) im stationären Zustand. Abbildung 5.9 stellt die Verläufe der im Bereich der Grenzfläche ausgegebenen Beträge der elektrischen Feldstärken dar, gasseitig (blau) und isolatorseitig (violett), sowie die hieraus berechneten arithmetischen Mittelwerte. Wie anhand des Diagramms klar erkennbar ist, weist das Isolierstoffvolumen einen nahezu homogenen Verlauf der elektrischen Feldstärke auf. Dies liegt in der resistiven Feldsteuerung der

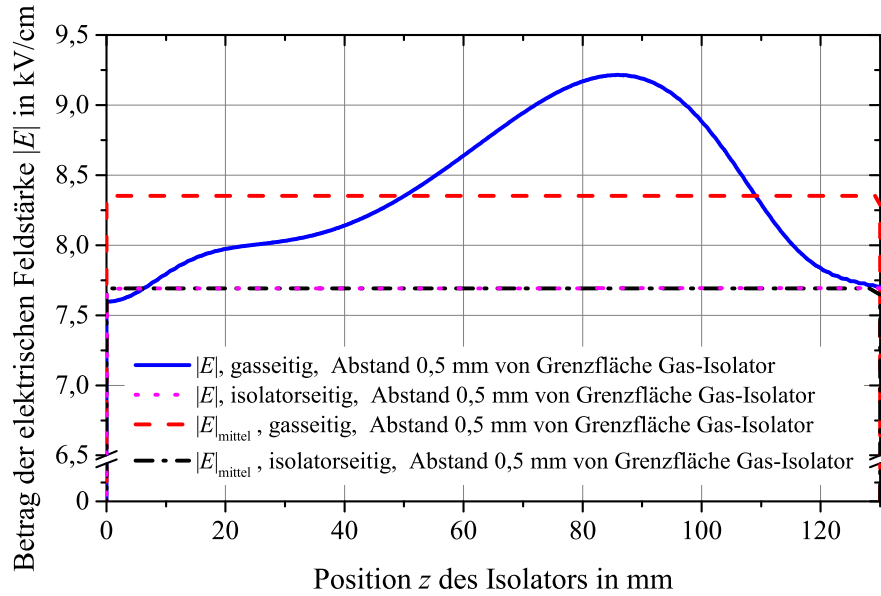


Abbildung 5.9: Darstellung der Feldverläufe entlang der  $z$ -Achse des Prüflings als Betrag der elektrischen Feldstärke: Blau dargestellt der gasseitig ausgegebene Verlauf entlang der Grenzfläche, rot der arithmetische Mittelwert der blauen Kurve, violett der Feldstärkeverlauf isolatorseitig, Schwarz der arithmetische Mittelwert der violetten Kurve. Potential  $\Phi = 100$  kV bei  $z = 130$  mm,  $\Phi = 0$  V bei  $z = 0$  mm. Leitfähigkeit des Isolators  $\kappa_{\text{Isol}} = 10^{-14}$  S/m, Leitfähigkeit des Isoliergases  $\kappa_{\text{Gas}} = 10^{-18}$  S/m.

hier für die Berechnung verwendeten Leitfähigkeit  $\kappa_{\text{Isol}} = 10^{-14}$  S/m begründet. Aufgrund der Feldverdrängung aus dem Isolierstoffvolumen in das schwächer leitfähige Isoliergas herrschen dort betragsmäßig höhere Feldstärken vor.

## 6 Prüflinge

Dieses Kapitel widmet sich den funktionell gefüllten Prüflingen, welche für die praktischen Versuche dieser Arbeit verwendet werden. Da viele dieser Prüfkörper eigens für diese Arbeit hergestellt werden, wird zunächst das Verfahren des Gießharzvergusses erläutert. Anschließend wird detailliert auf die Präparation der Prüfkörper für die unterschiedlichen praktischen Versuche eingegangen.

### 6.1 Herstellung von funktionell gefüllten Prüflingen auf Epoxidharzbasis

Für die Durchführung von Grundsatzuntersuchungen an Epoxidharzwerkstoffen mit diversen funktionellen Füllstoffen werden im Rahmen dieser Arbeit zylindrische Stäbe im Vakuumverguss angefertigt. Hierzu werden als Komponenten Harz, Härter, Beschleuniger und der entsprechende Füllstoff für die gezielte Einstellung der elektrischen Leitfähigkeit verwendet. Auf die Einmischung von anorganischen Füllstoffen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften wird verzichtet. Für eine lunkerfreie Herstellung wird die Vergussmasse in einer Vakuum-Gießanlage des Typs *Hübers KG Epsilon 1121-3-B* in einem evakuierbaren Mischkopf unter Vakuum aufbereitet und vergossen. Dieses Vorgehen ist zwingend notwendig, um Lufteinschlüsse zu vermeiden und somit für den Hochspannungsbereich verwertbare Vergussergebnisse zu erzielen [Bey 1983].

### 6.1.1 Rezepturen

#### Formulierung für mikrovaristorgefülltes Epoxidharz

Zur Herstellung mikrovaristorgefüllter Epoxidharz-Zylinder wird als Harzsystem das kommerziell verfügbare Bisphenol-A-Harz *EPIKOTE<sup>TM</sup> Resin 162*, der Härter *HY 1102* sowie der Reaktionsbeschleuniger *EPIKURE<sup>TM</sup> Catalyst 100* der Firma *Momentive* verwendet. Bei diesem System handelt es sich um ein hochgradig reines Epoxy-Anhydrid-System mit einer niedrigen Viskosität von etwa 8000 mPa·s (bei 20 °C, ohne Füllstoff). Die Mengenverhältnisse wurden gemäß Tabelle 6.1 gewählt, wobei der sehr hohe Gewichtsanteil des Füllstoffes „Mikrovaristoren“ zum einen für eine Partikelkonzentration im überperkolativen Bereich und zum anderen in der sehr hohen Dichte dieser Partikel von 5,6 g/cm<sup>3</sup> begründet liegt.

Tabelle 6.1: Verwendete Basisstoffe für mikrovaristorgefüllte Epoxidharz-Zylinder

Komponente	Typ	Anteil in Gewichtsteilen
Harz	EPIKOTE <sup>TM</sup> Resin 162	7,16
Härter	EPIKURE <sup>TM</sup> HY 1102	6,87
Beschleuniger	EPIKURE <sup>TM</sup> Catalyst 100	0,07
Füllstoff	Mikrovaristoren	85,90

#### Formulierung für Epoxidharz mit Partikeln beschichtet mit antimondotiertem Zinnoxid (ATO)

Für die Verwendung von antimondotiertem Zinnoxid (ATO) auf Glimmerplättchen als Füllstoff in zylindrischen Epoxidharzprüflingen wird die Rezeptur aus Tabelle 6.1 an diesen Füllstoff angepasst. Analog zu den mikrovaristorgefüllten Prüfkörpern wird das Bisphenol-A Harz *EPIKOTE<sup>TM</sup> Resin 162* verwendet, in Kombination mit dem Härter *EPIKURE<sup>TM</sup> Curing Agent 868* sowie dem Reaktionsbeschleuniger *EPIKURE<sup>TM</sup> Catalyst 100* (alle Basisstoffe: Firma *Momentive*). Die Viskosität dieser Vergussmasse liegt ohne Füllstoffpartikel bei 70 °C bei rund 20 mPa·s [Mom 2011]. Aufgrund der wesentlich geringeren Dichte dieser Partikel ergeben sich deutlich niedrigere Gewichtsanteile in der Vergussmasse. Die modifizierte Rezeptur ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2: Verwendete Basisstoffe für Epoxidharz-Zylinder mit ATO-beschichteten Partikeln

Komponente	Typ	Anteil in Gewichtsteilen
Harz	EPIKOTE <sup>TM</sup> Resin 162	31,25
Härter	EPIKURE <sup>TM</sup> HY1102 144 g	30,00
Beschleuniger	EPIKURE <sup>TM</sup> Catalyst 100	0,10
Füllstoff	Minatec <sup>©</sup> Partikel	38,65

### 6.1.2 Herstellungsverfahren

In der Vorbereitungsphase eines Vergusses werden die Partikel in einem Temperaturschrank über Nacht getrocknet. Außerdem werden Harz und Härter auf 60 °C vorerwärmt. Zunächst werden diese in einem geeigneten Gefäß bei einer Temperatur von 60 °C miteinander vermischt. Anschließend werden die Füllstoffpartikel hinzugegeben, die Temperatur weiterhin auf 60 °C gehalten und die Masse etwa 120 Minuten mit einem Flügelmixer verrührt. Durch die lange Einrührdauer soll eine gute Vernetzung zwischen Harz und Härter sowie eine möglichst homogene Verteilung der Füllstoffpartikel in der Vergussmasse sichergestellt werden. Im nächsten Schritt wird die Masse in den evakuierbaren Mischkopf der Vakuum-Gießanlage eingefüllt, der Beschleuniger hinzugegeben, die Masse auf einen Unterdruck von 100 mbar (abs.) evakuiert und für einige Minuten vermengt. Als letzter Schritt wird die Masse in eine zylindrische Form aus Messing unter Vakuum (50 mbar (abs.)) vergossen, die Form entnommen und entsprechend dem Temperaturprofil gemäß Tabelle 6.3 in einem Temperaturschrank ausgehärtet.

Durch das Verwenden eines Reaktionsbeschleunigers wird der Aushärtvorgang der Masse in der Form deutlich beschleunigt und somit eine Sedimentation verhindert.

Tabelle 6.3: Temperaturprofil zur Aushärtung von Epoxidharz-Zylindern mit Füllstoffpartikeln (Mikrovaristoren oder ATO-beschichtete Partikel)

Temperatur	Temperaturführung	Dauer
60 °C	Konstant	5 Stunden
60 °C → 90 °C	Rampe	5 Stunden
90 °C	Konstant	2 Stunden
120 °C	Konstant	2 Stunden
150 °C	Konstant	15 Stunden
Anschließend langsames Abkühlen auf Raumtemperatur		

Dies ist vor allem bei Mikrovaristor-Partikeln aufgrund der hohen Dichte und der Größe der Partikel wichtig. Das verwendete Temperaturprofil mit mehreren Härtungszyklen bei verschiedenen Temperaturstufen sorgt für eine gleichmäßige Aushärtung der Vergussmasse. Außerdem werden hierdurch Eigenspannungen oder Risse nach dem Gelieren der Vergussmasse vermieden. Zur Überprüfung einer homogenen Füllstoffverteilung im zylindrischen Prüfling werden an jedem vergossenen Zylinder an beiden Stirnflächen scheibenförmige Segmente durch mechanisches Abstechen an einer Drehbank entnommen. Eine elektrische Messung des Volumenwiderstandes der mit Elektroden präparierten Scheibensegmente muss anschließend zeigen, dass die elektrische Leitfähigkeit über die Höhe konstant ist und der Füllstoff somit homogen über der Höhe des Zylinders verteilt wurde.

## 6.2 Präparation der Prüfkörper

### 6.2.1 Prüflinge zur Charakterisierung von Werkstoffproben

#### Vorbereitung der Prüflinge für die Bestimmung der Volumenleitfähigkeit

Für die elektrische Charakterisierung der erstellten Werkstoffproben, insbesondere zur Bestimmung der Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$ , werden die zylindrischen Prüflinge (Durchmesser 45 mm) zunächst mechanisch bearbeitet. Hierzu werden die beiden Stirnflächen zwecks Prüfung auf homogenen Verguss und der Entfernung der Randstücke in einer Drehbank mechanisch abgestochen. Anschließend werden aus dem verbleibenden Prüfling scheibenförmige Segmente, ebenfalls durch mechanisches Abstechen an einer Drehbank, entnommen. Die Höhe dieser Segmente wird in der Regel zu  $h = 2 \text{ mm}$  gewählt.<sup>1</sup> Die tatsächliche Höhe der Scheibensegmente und die Parallelität der Oberflächen werden an jedem Prüfling ermittelt. Bei Abweichungen  $>1\%$  wird der Prüfling entweder aussortiert oder die tatsächliche Höhe zur Bestimmung der Feldstärke  $E$  im Volumen des Prüflings verwendet.

Zur Messung der elektrischen Volumenleitfähigkeit der Werkstoffproben wird eine

---

<sup>1</sup>Abweichend hierzu wird an Prüflingen für den Einsatz im Langzeitversuch auch  $h = 3 \text{ mm}$  oder  $h = 4 \text{ mm}$  gewählt, zwecks Variation der elektrischen Feldstärke  $E$  einzelner Prüflinge bei konstanter Prüfspannung  $U$  des Versuchsstandes.



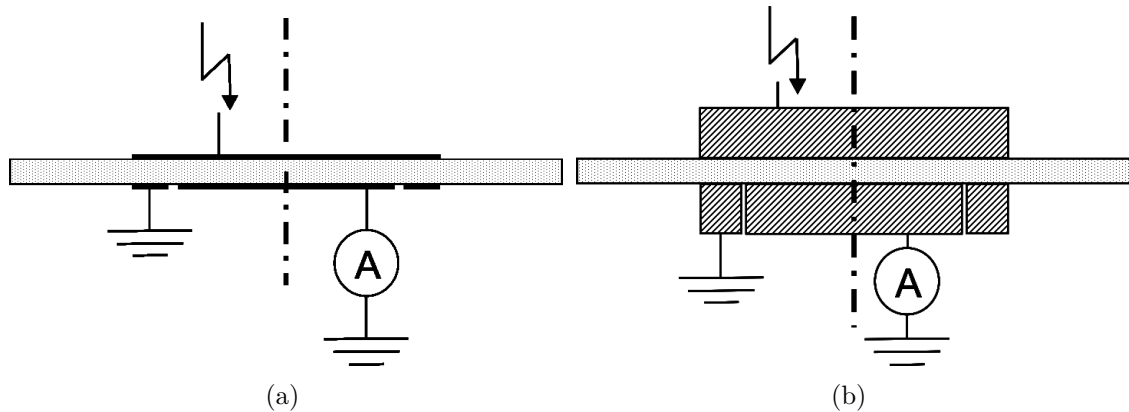


Abbildung 6.1: Schnittansicht des scheibenförmigen Prüflings (grau) mit geschützten Elektroden zur Bestimmung der Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$ , (a) Realisierung mittels aufgetragenem Silberleitlack, (b) Realisierung durch Anpressen von massiven Messingelektroden auf die Prüflingsoberflächen

Schutzring-Elektrodenanordnung gemäß [IEC 60093] verwendet (Abbildung 6.1). Hierdurch wird zum einen ein homogenes elektrisches Feld im Werkstoff gewährleistet, zum anderen verhindert der mit Erdpotential verbundene Schutzring, dass auch der Stromanteil entlang der Oberfläche des Prüflings am Messgerät erfasst wird. Für die Sicherstellung einer guten Kontaktierung der Werkstoffproben werden sämtliche Prüflinge aus Epoxidharz an der Oberfläche mit Elektroden präpariert. Nach vorhergegangener gründlicher Reinigung der Flächen mit Isopropanol werden die Schutzring-Elektroden in Form von Silberleitlack unter Verwendung von aufgeklebten Schablonen aufgebracht (Abbildung 6.1 (a)). Die leitfähigen Flächen werden mittels Messingelektroden über einen Federkontakt im Versuchsstand eingespannt.

Für die Untersuchungen an mikrovaristorgefüllten Epoxidharzprüflingen und zur Messung an Vergleichs-Prüflingen aus HTV-Silikon werden anstelle der Aufbringung der Elektroden mit Silberleitlack Messingelektroden mit geschützter Elektrode verwendet (Abbildung 6.1 (b)). Der Grund hierfür ist die schlechte Haftung von Silberleitlack auf HTV-Silikon. Die Messingelektroden werden mit einer Kontaktkraft  $F = 10 \text{ N}$  direkt auf die Prüfkörper aufgepresst, um eine gute Kontaktierung zu erzielen. Die hochspannungsseitige Elektrode verfügt an ihrer Befestigung über ein Kugelgelenk, so dass eine vollflächige, planare Kontaktierung der Prüflinge gegeben ist. Dieses Verfahren wurde bereits in [Deb 2015] erfolgreich angewendet.

Der Feuchtegehalt der Werkstoffproben und der Umgebung hat einen erheblichen

Einfluss auf die elektrische Volumenleitfähigkeit. Daher werden alle Prüflinge einem Trocknungsprozess unterzogen (115 °C bei <1 mbar (abs.) über Nacht, vgl. Kapitel 5.1.1). Die anschließende Lagerung der Prüflinge erfolgt in einem Exsikkator unter Einsatz von Trockenmittel auf Basis von Silikagel, zur Vermeidung der Anlagerung von Feuchtigkeit im Prüfling oder auf dessen Oberflächen. Weiterhin wird das Trockenmittel ebenfalls in sämtlichen Messaufbauten in Temperaturschränken verwendet und die Luftfeuchte dort zusätzlich durch Feuchtigkeitssensoren überwacht und dokumentiert.

Durch diese Vorkehrungen werden verwertbare und reproduzierbare Messergebnisse an den Werkstoffproben sichergestellt.

### **Vorbereitung der Prüflinge für die Bestimmung der Oberflächenleitfähigkeit sowie der oberflächennahen Volumenleitfähigkeit**

Bei den hier beschriebenen Prüflingen zur Bestimmung der oberflächennahen Volumenleitfähigkeit  $\kappa_S$  handelt es sich um die zylindrischen Isolatoren mit realitätsnahen Abmessungen. Bei deren Geometrie ist eine Bestimmung der spezifischen Oberflächenleitfähigkeit gemäß [IEC 60093] nicht möglich, da die dritte Schutzelektrode zum Ableiten von Volumenströmen nicht angewendet werden kann. Aufgrund der Nichtlinearität (infolge der Potentialbarrieren an den Korngrenzen der Partikel) kann davon ausgegangen werden, dass die Eindringtiefe des gemessenen Stroms in das Volumen des Werkstoffes gering sein muss. Daher werden Messungen im Bereich der Oberfläche der Zylinder durchgeführt, indem auf der zuvor mit Isopropanol gereinigten Oberfläche<sup>2</sup> ringförmig Silberleitlecke Elektroden aufgetragen werden und diese anschließend durch massive Aluminium-Ringelektroden umfasst werden (vgl. Abbildung 6.2).

Da jedoch die aktive Schichtdicke, welche zum Stromtransport im oberflächennahen Volumen beiträgt, nicht bekannt ist, kann das Ergebnis dieser Messung nicht als spezifische Oberflächenleitfähigkeit berechnet werden. Deshalb wird stattdessen der gemessene Strom  $I$  über der Spannungsbeanspruchung pro Länge  $U/l$  ausgewertet und dargestellt, wobei  $l$  den Abstand der mittleren zur unteren Ringelektrode an der

---

<sup>2</sup>Sofern die Umfangsfläche nach der Reinigung mit Isopropanol behandelt wird (zum Beispiel werden manche Prüflinge an der Umfangsfläche angeschliffen), ist dies bei den entsprechenden Messungen in Kapitel 7 explizit angemerkt.

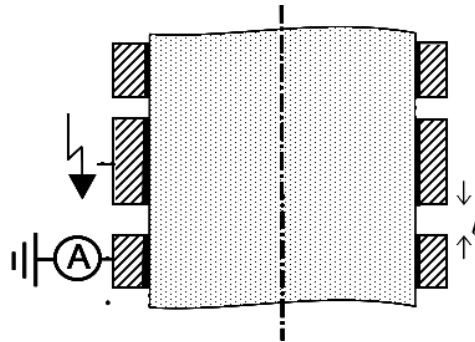


Abbildung 6.2: Schnittansicht des zylindrischen Prüflings mit aufgetragenen Elektroden aus Silberleitlack (schwarz) und umfassten Aluminiumelektroden im Abstand  $l$  zwischen Hochspannungs- und Erdelektrode für die Bestimmung der Leitfähigkeit im Bereich der Zylinderoberflächen.

Zylinderoberfläche darstellt (vgl. Abbildung 6.2). Analog zu den Prüflingen für die Bestimmung der Volumenleitfähigkeit werden auch diese Prüfkörper einem Trocknungsprozess (vgl. Kapitel 5.1.1) mit anschließender Lagerung in einem Exsikkator unterzogen.

### 6.2.2 Prüflinge für Hochspannungsversuche

Zur Messung im gasisolierten Prüfaufbau werden die zylindrischen Gießharz-Prüfkörper für den Einsatz im Prüflings-Wechselmagazin auf eine Höhe  $h = 130 \text{ mm}$  abgestochen und anschließend an den Stirnflächen vollflächig mit Silberleitlack kontaktiert. Danach wird der Zylinder in massive Elektroden aus Aluminium mit silberhaltigem, leitfähigem Kleber auf Epoxidharzbasis eingeklebt (vgl. Abbildung 6.3). Die Elektroden haben zwar bei reiner Gleichfeldbeanspruchungen weniger Einfluss auf die Feldverteilung, da im reinen Gleichfeld eine Feldsteuerung über die Leitfähigkeiten erfolgt und eine geometrische Feldsteuerung daher nicht zwangsweise notwendig ist. Sie dienen aber bei Versuchen mit Mischfeldbeanspruchung der Vermeidung einer Feldüberhöhung am Außenrand der Stirnseite (Tripelzone Zylinderkante-Isoliergas-Elektrode). Dies ist vor allem für die Stoßspannungsversuche unbedingt notwendig, um Überschlüge infolge von Feldüberhöhungen zu verhindern. Außerdem wird durch die Elektroden eine näherungsweise homogene Feldverteilung über der Höhe des Zylinders erreicht. Bei einer Strommessung durch diese Prüflinge wird aufgrund der Kontaktierung durch ein niederspannungsseitig angeschlossenes Picoampèremeter

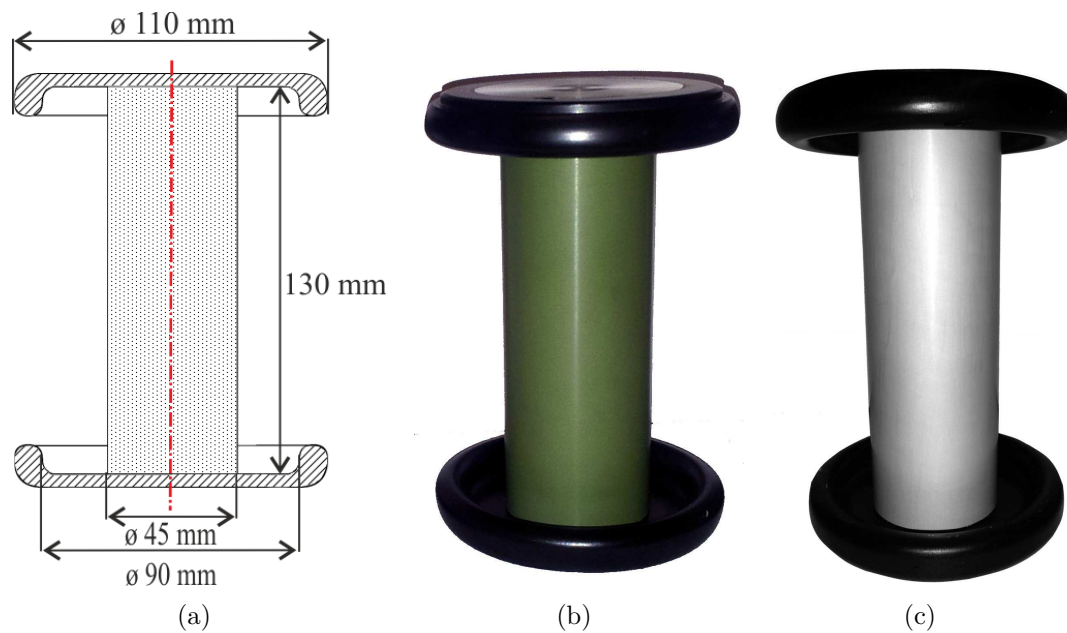


Abbildung 6.3: Prüfling für Hochspannungsversuche. (a) Skizze mit Abmessungen; (b) Foto eines mikrovaristorgefüllten Epoxidharz-Prüflings; (c) Foto eines ATO-gefüllten Epoxidharz-Prüflings. Die Aluminiumelektroden sind zur Vermeidung von Reflexionen bei der Infrarot-Thermografie mit mattschwarzer Farbe lackiert.

stets der Gesamtstrom (Oberfläche, Randschicht und Volumen) erfasst. Analog zu den Prüflingen für die Bestimmung der Volumen- und Oberflächenleitfähigkeit werden auch diese Prüfkörper einem Trocknungsprozess mit anschließender Lagerung in einem Exsikkator unterzogen. Durch das Evakuieren des Prüfaufbaus und das anschließende Befüllen mit trockenem Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) sowie den Einsatz von Trockenmittel wird auch hier die Aufnahme von Feuchtigkeit gezielt vermieden.

## 7 Experimentelle Untersuchungen

An den hergestellten, funktionell gefüllten Epoxidharz-Prüfkörpern (vgl. Kapitel 6) werden zahlreiche Messungen durchgeführt. Speziell im Falle der mikrovaristorgefüllten Prüfkörper werden weitere Prüflinge auf Basis von gefülltem HTV-Silikon zu Vergleichszwecken vermessen, welche über einen Forschungspartner bezogen wurden. Dieser Abschnitt ist gegliedert nach der Art der verwendeten, funktionellen Füllstoffpartikel (Mikrovaristoren auf ZnO-Basis und Glimmerpartikel mit einer nanoskaligen Beschichtung aus antimondotiertem Zinnoxid (ATO)). Soweit nicht explizit angegeben, werden ausschließlich mit den Partikeln gefüllte Polymere charakterisiert. Dabei handelt es sich um gefülltes Epoxidharz (EP) oder gefülltes, hochtemperaturvernetztes Silikon (HTV-Silikon).

Die gewonnenen elektrischen Messergebnisse werden zusätzlich mit Hilfe von Werkstoffanalysen und Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) untermauert.

### 7.1 Charakterisierung von mikrovaristorgefüllten Polymeren

#### 7.1.1 Nichtlineare Leitfähigkeit von mikrovaristorgefüllten Polymeren

Aufgrund der feldstärkeabhängigen, nichtlinearen Leitfähigkeit eignen sich mikrovaristorgefüllte Polymere insbesondere für Anwendungen zur elektrischen Feldsteuerung. Erste Produkte mit mikrovaristorgefüllten Feldsteuerungen waren Aufschiebekabelendverschlüsse aus mikrovaristorgefüllten Silikon [Boe 2001]. In Abbildung 7.1 ist das Ergebnis einer Gleichspannungsmessung in Form der  $E$ - $J$ -Kennlinie eines

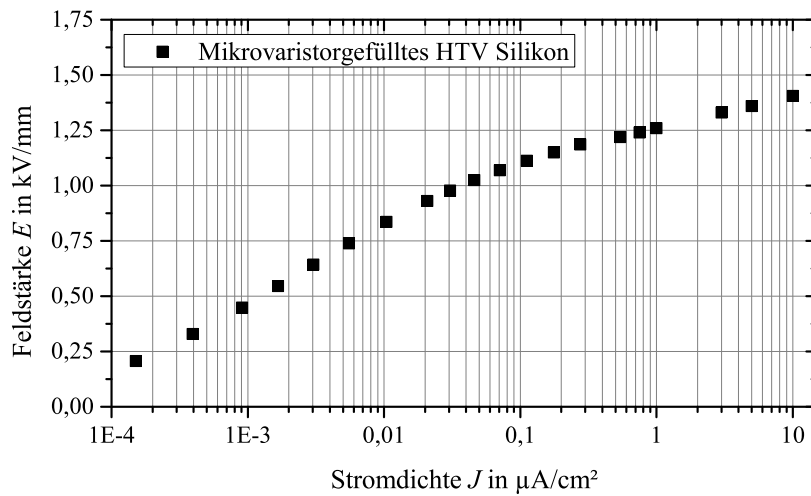


Abbildung 7.1: Aus der gemessenen  $U$ - $I$ -Kennlinie berechnete, nichtlineare  $E$ - $J$ -Kennlinie eines mikrovaristorgefüllten HTV-Silikonprüflings bei  $\vartheta = 23^\circ\text{C}$ . Die Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  beträgt etwa  $1,25\text{ kV}/\text{mm}$ .

Prüflings aus kommerziell verfügbarem HTV-Silikon<sup>1</sup> zu sehen. Vermessen wird ein scheibenförmiger Prüfling mit einer Dicke  $d = 2\text{ mm}$ , die Kontaktierung erfolgt gemäß Abschnitt 6.2.1, Abbildung 6.1 (b). Die Messung der Kennlinie erfolgt gemäß der in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Vorgehensweise, d.h. es werden stabile Stromwerte gemessen<sup>2</sup>. Die angelegte Spannung  $U$  und der Strom  $I$  sind für eine geometrieunabhängige Darstellung als Feldstärke  $E$  und Stromdichte  $J$  umgerechnet. Als charakteristischer Punkt zur Bezeichnung der  $E$ - $J$ -Kennlinie ist die Angabe der Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  sinnvoll. In dieser Arbeit beziffert die Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  stets den Wert der elektrischen Feldstärke bei Gleichspannungsbeanspruchung, welche zum Erreichen einer Stromdichte  $J = 1\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$  vorherrschen muss (vgl. Abschnitt 4.2).

Charakteristisch für den vermessenen Verbundwerkstoff in Abbildung 7.1 ist das Erreichen der Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  bei etwa  $1,25\text{ kV}/\text{mm}$  sowie ein stark nichtlineares Verhalten besonders bei höheren Feldstärken, gut zu erkennen in der halblogarithmisch dargestellten  $E$ - $J$ -Kennlinie.

Anhand der  $E$ - $J$ -Kennlinie der Abbildung 7.1 ist klar erkennbar, dass dieser gefüllte

<sup>1</sup>Wacker SLM 79049 HTV-Silikonkautschuk für nichtlineare Feldsteuerung in elektrotechnischen Anwendungen[Wac 2008]

<sup>2</sup>Bei der Messung der Kennlinie mikrovaristorgefüllter Polymere sind mit Abschluss der Spannungsregelung bereits alle Polarisierungseffekte vollständig abgeklungen.

Werkstoff nicht für Hochfeldbeanspruchungen konzipiert wurde, da die Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  unterhalb der Betriebsfeldstärke in gasisolierten Anlagen liegt. Die bis dato charakterisierten Mikrovaristoren, eingemischt in HTV-Silikon mit Füllgraden oberhalb der Perkolationsschwelle, weisen Schaltpunktfeldstärken zwischen 0,5 kV/mm und 1,2 kV/mm auf [Deb 2015]. Für Isoliersysteme mit einer definierten Leitfähigkeit sollte die Schaltpunktfeldstärke möglichst nicht erreicht oder gar überschritten werden. Ausgehend von einer Betriebsfeldstärke von etwa 3 kV/mm bedeutet dies die Forderung einer Schaltpunktfeldstärke von mindestens 6 kV/mm, um im Normalbetrieb geringe elektrische Verluste zu gewährleisten und im Falle von auftretenden Überspannungen (bzw. für die geforderten Blitz- und Schaltstoß-Prüfspannungspegel) eine ausreichende Sicherheitsreserve aufzuweisen (siehe Abschnitt 4.2).

### 7.1.2 Mikrovaristoren für Hochfeldbeanspruchung

In den theoretischen Betrachtungen dieser Arbeit zur Auslegung des Isolierwerkstoffs für DC-GIS wurde gezeigt, dass eine Skalierung der typischen Kennlinie von Mikrovaristoren auf höhere elektrische Feldstärken zu einem geeigneten Werkstoff führen könnte (vgl. Abschnitt 4). Um dies in der Praxis zu realisieren, muss bei der Herstellung der Partikel über die Prozessparameter eine deutlich höhere Anzahl von Korngrenzen eingestellt werden (vgl. Abschnitt 2.5.2). Weiterhin ist eine Reduzierung der Nichtlinearität wünschenswert, um im Falle von Überspannungen das Erreichen von sehr hohen Stromdichten und damit verbundene mögliche Beschädigungen oberhalb der Durchbruchfeldstärke zu vermeiden.

#### ***E-J-Kennlinien von mit Mikrovaristorpulver der Charge A gefüllten Epoxidharz-Werkstoffprüflingen***

Durch einen Hersteller von Mikrovaristoren wurde eine Mustercharge neuartiger Mikrovaristoren erstellt, Charge A, welche als Ziel vor allem eine deutliche Erhöhung der Schaltpunktfeldstärke hatte. Außerdem wurde eine Reduzierung der Partikelgröße angestrebt<sup>3</sup>, um eine Sedimentation im Verguss aufgrund zu großer und zu schwerer Fraktionen im Füllstoff zu vermeiden. Eine Messung der Partikelgrößenverteilung

---

<sup>3</sup>Bei Standard-Mikrovaristoren liegen übliche Partikelgrößen im Bereich zwischen 30 µm und 120 µm. Angestrebt werden Partikelgrößen <30 µm.

des Mikrovaristorpulvers der Charge *A* zeigt, dass diese im Durchmesser zwischen  $2\text{ }\mu\text{m}$  und  $30\text{ }\mu\text{m}$  liegt, im Mittel  $d_{50} = 8,1\text{ }\mu\text{m}$ . Eine REM-Aufnahme der Partikel ergibt jedoch, dass diese überwiegend aus Bruchstücken bestehen und nur sehr wenige sphärische Partikel aufweisen (vgl. Abbildung 7.2(b)). Der Grund für die unterschiedliche Beschaffenheit des Mikrovaristorpulvers der Charge *A* ist eine mechanische Nachbehandlung: Die Partikel wurden zwecks Reduzierung der Partikelgröße vermahlen.

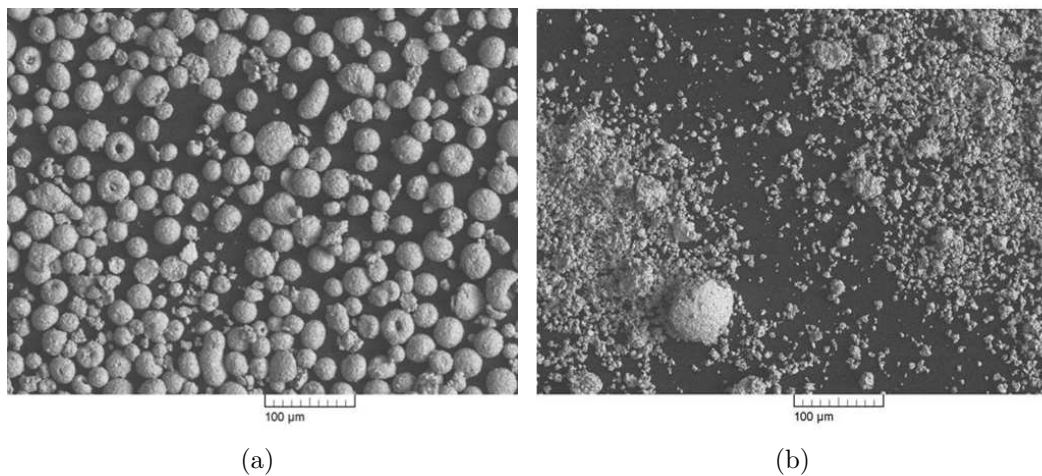


Abbildung 7.2: REM-Aufnahmen: (a) Übliches Mikrovaristorpulver für geringe Schaltpunktfeldstärken, überwiegend sphärische Partikel; (b) Mikrovaristorpulver der Charge *A* mit vielen Bruchstücken und wenigen sphärischen Partikeln.

Unter Verwendung der Partikel der Charge *A* werden zwei zylindrische Prüflinge erstellt (Rezeptur siehe Abschnitt 6.1). Prüfling *A1* wird, abweichend zur dargestellten Rezeptur, mit einem Massenanteil von 80 % gefüllt, Prüfling *A2* hingegen mit 85 % Massenanteil. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden stets die *Massenanteile* des Füllstoffpulvers in der Polymermatrix angegeben, die Angabe erfolgt in %. Abbildung 7.3 zeigt die bei  $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  gemessene Kennlinie von Scheiben, welche aus dem oberen und unteren Abschnitt des zylindrischen Prüflings *A1* entnommen wurden. Im Vergleich zu Abbildung 7.1 ist sehr deutlich erkennbar, dass die erwünschte Verschiebung der Schaltpunktfeldstärke hin zu deutlich höheren Feldstärken offenbar erfolgreich war.

Zugleich stellt sich bei den Messungen aber auch heraus, dass die mit dem neuen Mikrovaristorpulver gefüllten Epoxidharzprüflinge offenbar im Vergleich zu kommerziell verfügbarem mikrovaristorgefüllten HTV-Silikon eine geringere Stromtragfähigkeit



aufweisen. Bereits bei Stromdichtewerten von etwa  $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  werden elektrische Durchschläge durch das Volumen der Scheibensegmente beobachtet, wobei diese hierdurch irreversibel zerstört werden. In Einklang mit diesem Ergebnis wurde bereits in [Deb 2015] anhand von Messungen festgestellt, dass mikrovaristorgefülltes HTV-Silikon mit großen Mikrovaristor-Partikeln und einer geringen Schaltpunktfeldstärke von  $0,5 \text{ kV}/\text{mm}$  eine höhere Stromtragfähigkeit besitzt als HTV-Silikon, welches mit kleineren Mikrovaristorpartikeln gefüllt wurde und eine höhere Schaltpunktfeldstärke von  $1 \text{ kV}/\text{mm}$  aufweist. Als Konsequenz werden die  $E$ - $J$ -Kennlinien aller Epoxidharz-Prüflinge, welche mit den neuen Hochfeld-Mikrovaristoren gefüllt sind, mit Stromdichten kleiner als  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  vermessen, also unterhalb der Schaltpunktfeldstärke  $E_b$ . Mikrovaristorgefüllte Polymere als Isolierwerkstoffe sollten nicht zuletzt aus diesem Grund im Dauerbetrieb deutlich unterhalb ihrer Schaltpunktfeldstärke dimensioniert werden. Die Schaltpunktfeldstärke beträgt im Falle der Prüflinge *A1* etwa  $E_b \approx 5,5 - 6 \text{ kV}/\text{mm}$ . Sie liegt somit also deutlich höher als bei allen bisherigen bekannten mikrovaristorgefüllten Polymeren.

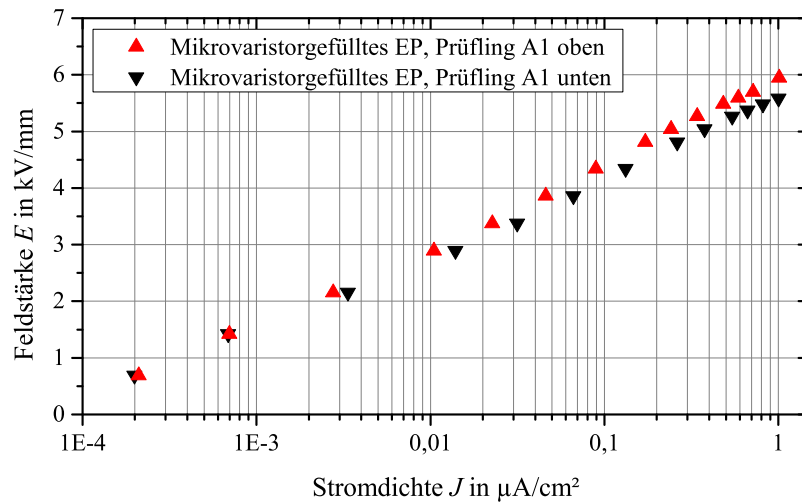


Abbildung 7.3:  $E$ - $J$ -Kennlinien des Prüflings *A1*, Epoxidharz mit einem Mikrovaristorpulveranteil von 80 % aus dem oberen bzw. unteren Bereich des zylindrischen Prüflings. Die Schaltpunktfeldstärke beträgt bei diesen Prüflingen  $5,5 \text{ kV}/\text{mm}$  (unten) bzw.  $6 \text{ kV}/\text{mm}$  (oben).

Analog hierzu sind in Abbildung 7.4 die Messergebnisse an Prüfling *A2* dargestellt. Zunächst ist erkennbar, dass die Schaltpunktfeldstärke durch den höheren Füllstoffanteil in Prüfling *A2* im Vergleich zu *A1* etwas reduziert wurde. Diese beträgt nun etwa  $E_b \approx 4,5 \text{ kV}/\text{mm}$ . Offenbar führt eine Erhöhung des Füllstoffanteils zu einer größeren

Zahl an leitfähigen Pfaden und zu kürzeren leitfähigen Ketten. Durch kürzere Ketten von leitfähig verbundenen Partikeln ergibt sich eine geringere Anzahl Korngrenzen und somit eine geringere Anzahl an Potentialbarrieren entlang einer Füllstoffkette. Demzufolge wird eine Stromdichte von  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  bei einer geringeren Feldstärke erreicht. Weiterhin kann den Diagrammen entnommen werden, dass bei Prüfling *A1* eine größere Abweichung der Kennlinie zwischen oberem und unterem Bereich des Zylinders festzustellen ist. Prüfling *A2* hingegen zeigt eine nahezu identische Kennlinie bei Segmenten aus dem oberen und unterem Bereich des Zylinders. Offenbar sind die Partikel innerhalb des Prüflings *A2* homogener verteilt.

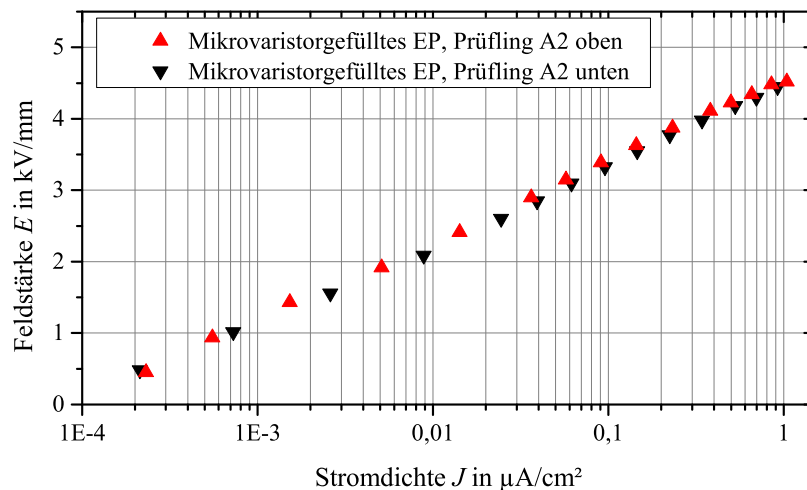


Abbildung 7.4:  $E$ - $J$ -Kennlinien des Prüflings *A1* mit einem Mikrovaristorpulveranteil von 85 % aus dem oberen bzw. unteren Bereich der zylindrischen Prüflings. Aufgrund des höheren Füllgrades hat sich die Schwellenfeldstärke etwas reduziert, diese beträgt nun etwa  $4,5 \text{ kV}/\text{mm}$ , gemessen an Segmenten sowohl im oberen als auch im unteren Bereich des Prüflings *A2*.

### **$E$ - $J$ -Kennlinien von mit Mikrovaristorpulver der Charge *B* gefüllten Epoxidharz-Werkstoffprüflingen**

Im Anschluss an Charge *A* wird durch den Hersteller ein weiteres Mikrovaristorpulver in einer Mustercharge in geringer Menge hergestellt: Charge *B*. Die Partikelverteilung weicht hier allerdings etwas ab. Neben einem Anteil mit Partikeldurchmessern im Bereich von  $1,5 - 12 \mu\text{m}$  werden in dieser Charge auch Anteile im Größenbereich um  $20 \mu\text{m}$  und um  $50 \mu\text{m}$  in der Verteilung gemessen. Der  $d_{50}$ -Wert beträgt etwa

25  $\mu\text{m}^4$ . Abbildung 7.5 zeigt die Kennlinie eines Segments des mit 85 % gefüllten Epoxidharz-Zylinders, Prüfling *B*, welcher mit diesem Mikrovaristorpulver gefüllt wurde.

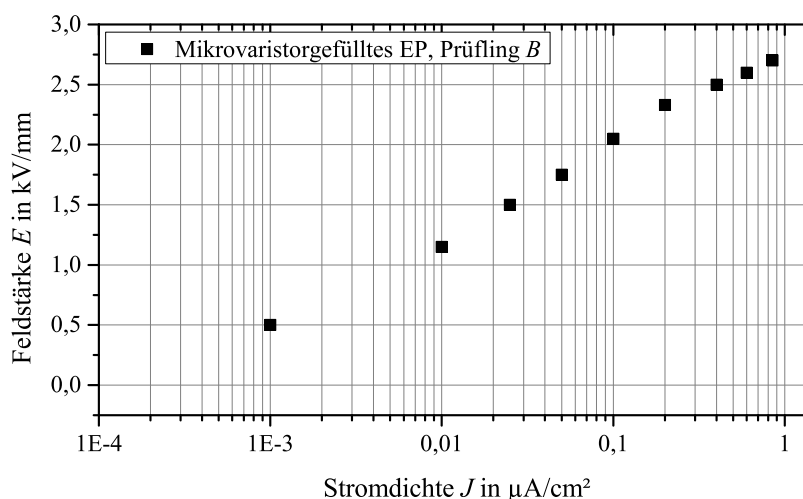


Abbildung 7.5:  $E$ - $J$ -Kennlinien des Prüflings *B*, Epoxidharz gefüllt mit einem Mikrovaristorpulveranteil von 85 %

Im direkten Vergleich mit den Messergebnissen der Segmente aus Charge *A* ist in der Kennlinie der Abbildung 7.5 klar ein Abknicken der nichtlinearen  $E$ - $J$ -Kennlinie bei deutlich geringeren Feldstärken festzustellen. Um eine Stromdichte von 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  im Volumen dieser Werkstoffprobe zu erreichen, muss lediglich eine Feldstärke  $E_b$  von etwa 2,8  $\text{kV}/\text{mm}$  angelegt werden. Offenbar führen die größeren Partikelfractionen bei dem Mikrovaristorpulver der Charge *B* bei Einmischung in Epoxidharz zu einer Reduzierung der Schaltpunktfeldstärke des Verbundwerkstoffs.

### **$E$ - $J$ -Kennlinien mit Mikrovaristorpulver der Charge *C* gefüllter Epoxidharz-Werkstoffprüflinge**

Das Mikrovaristorpulver der Charge *B* zeigt, eingemischt in Epoxidharz, zu niedrige Schaltpunktfeldstärken. Daher wird bei der Herstellung einer weiteren Charge

<sup>4</sup>Zum Mikrovaristorpulver der Charge *B* wurden keine REM-Aufnahmen erstellt, die Partikelgrößenverteilung deutet allerdings auf eine zu Abbildung 7.2 (b) ähnliche Zusammensetzung des Mikrovaristorpulvers hin, mit einem etwas erhöhtem Anteil an großen Bruchstücken aus sphärischen Mikrovaristorpartikeln.

Mikrovaristorpulver, bezeichnet mit Charge *C*, eine höhere Schaltpunktfeldstärke sowie eine Partikelverteilung ohne Anteile im Größenbereich oberhalb von  $50\text{ }\mu\text{m}$  angestrebt. Abbildung 7.6 zeigt, dass der Hersteller des Mikrovaristorpulvers durch diese Modifikation eine Erhöhung der Schaltpunktfeldstärke in der  $E$ - $J$ -Kennlinie eines mit Mikrovaristorpulver der Charge *C* gefüllten Epoxidharzprüflings erzielen konnte. Zum Erreichen einer Stromdichte von  $1\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$  wird eine Feldstärke von etwa  $3,3\text{ kV}/\text{mm}$  benötigt.

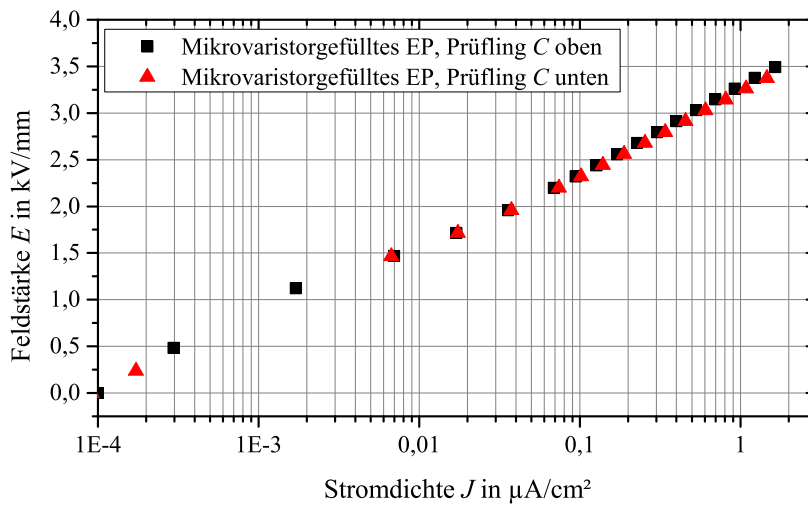


Abbildung 7.6:  $E$ - $J$ -Kennlinien des Epoxidharz-Prüflings *C* mit einem Mikrovaristorpulveranteil von 85 % aus dem oberen bzw. unteren Bereich der zylindrischen Prüflings

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Reduzierung der Partikelgröße sowie eine deutliche Erhöhung der Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  in allen drei Chargen der Mikrovaristorpulver erfolgreich umgesetzt wurden. Im Zuge der Messungen kann beobachtet werden, dass die Prüflinge aus gefülltem Epoxidharz bereits bei einer (im Vergleich zu mikrovaristorgefülltem HTV-Silikon) relativ geringen Stromdichte (etwa  $2\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) infolge eines elektrischen Durchschlags irreversibel zerstört werden. Dies gilt für sämtliche Epoxidharz-Prüflinge, welche mit Mikrovaristorpulvern der Chargen *A*, *B* oder *C* gefüllt wurden, und lässt den Schluss zu, dass die zur Leitfähigkeit beitragenden Strompfade entweder in geringerer Anzahl vorhanden sind oder eine geringere Stromtragfähigkeit aufweisen. Letzteres kann z.B. mit kleineren ZnO-Körnern erklärt werden, welche bei der Herstellung von Pulvern mit einer höheren Schaltpunktfeldstärke gezielt im Sinterprozess eingestellt werden (vgl.

Abschnitt 2.5.2).

Abbildung 7.7 zeigt die feldstärkeabhängigen Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha(E)$  der gefüllten Epoxidharz-Prüflinge *A1*, *B* und *C*, welche gemäß Gleichung 4.2 aus den Messpunkten der *E-J*-Kennlinien berechnet werden. Bei allen drei Prüflingen steigt die Nichtlinearität mit steigender Feldstärke, was ein typisches Verhalten für mikrovaristorgefüllte Polymere darstellt. Prüfling *C* weist die höchsten Werte für  $\alpha(E)$  auf, Prüfling *A* die geringsten Werte.

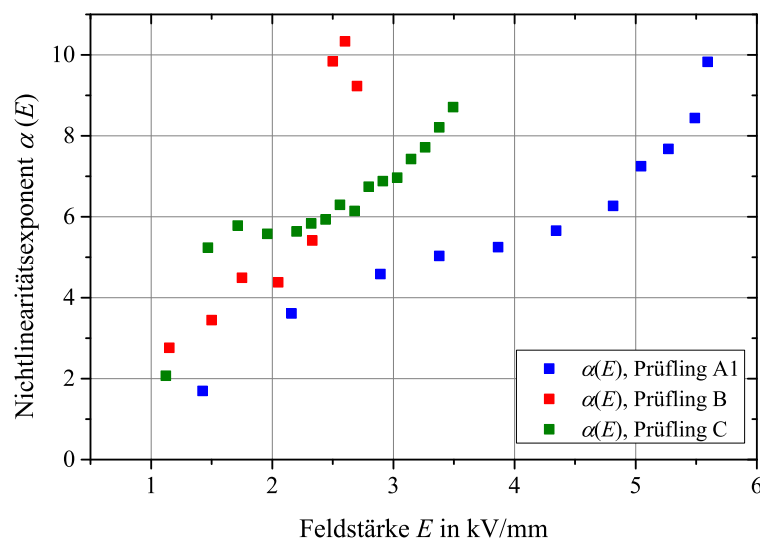


Abbildung 7.7: Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha(E)$  der drei mikrovaristorgefüllten Epoxidharz-Prüflinge *A1*, *B* und *C*

Für den Einsatz in Isoliersystemen für die HGÜ werden in allen drei Chargen noch nicht die benötigten, sehr hohen Schaltpunktfeldstärken erreicht. Allenfalls Prüfling *A1* erreicht einen Schaltpunkt von  $E_b = 6$  kV/mm, dieser wird jedoch durch die Temperaturabhängigkeit der Kennlinie bei höheren Temperaturen deutlich abgesenkt (siehe Abschnitt 7.1.3). Eine weitere Anpassung des Füllstoffes, insbesondere höhere Schaltpunktfeldstärken, ist durch eine Weiterentwicklung der Rezepturen denkbar. Der Hersteller hat eine Weiterentwicklung angekündigt, diese bedeutet allerdings einen großen Entwicklungs- und Kostenaufwand. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit weiter auf die hergestellten Chargen zurückgegriffen. Insbesondere wird für die weiteren Grundsatzuntersuchungen Mikrovaristorpulver der Charge *C* für die Erstellung von Prüfkörpern eingesetzt, welches in größerer Menge produziert wurde.

Dass die eigentlich angestrebte Schaltpunktfeldstärke von  $E_b = 6 \text{ kV/mm}$  von diesen nicht erreicht wird, ist an gegebener Stelle durch entsprechende Skalierung der Versuchsparameter berücksichtigt.

### 7.1.3 Temperaturabhängigkeit der Kennlinie

Die Temperaturabhängigkeit der  $E$ - $J$ -Kennlinie wird unter Verwendung des Prüfaufbaus gemäß Abschnitt 5.1.1 an Segmenten der beiden Prüfkörper  $A1$  und  $A2$  gemessen. In Temperaturschritten von  $\Delta\vartheta = 20 \text{ K}$  wird die Kennlinie der Prüflinge jeweils bei  $\vartheta = 20, 40, 60, 80$  und  $100^\circ\text{C}$  erfasst, wobei die Prüflinge zwischen den Messungen nicht aus dem Versuchsaufbau entnommen werden. Die Messergebnisse des Prüflings  $A1$  (Abbildung 7.8) zeigen eine deutliche Verschiebung der Kennlinie in Richtung höherer Stromdichten bei steigender Temperatur. Die elektrische Leitfähigkeit nimmt also mit steigender Temperatur zu, von  $20^\circ\text{C}$  auf  $100^\circ\text{C}$  etwa um einen Faktor von 100. Dieser Effekt ist reversibel, d.h. nach dem Abkühlen der Prüflinge auf  $20^\circ\text{C}$  wird wieder die ursprüngliche  $E$ - $J$ -Kennlinie erreicht.

Das selbe grundsätzliche Temperaturverhalten zeigen auch die Segmente des zweiten Prüfkörpers  $A2$  mit höherem Füllgrad von 85 % (vgl. Abbildung 7.9), welche an mehreren Prüflingen aus dem oberen und unteren Bereich wiederholt und mehrfach bestätigt wurden.

Insgesamt ist eine sehr hohe Temperaturabhängigkeit der  $E$ - $J$ -Kennlinie feststellbar. Im Hinblick auf die charakteristische Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  bedeutet dies eine drastische Reduzierung bei steigender Temperatur. Ausgehend von den Messwerten in Abbildung 7.8 wird bei einer Feldstärke  $E = 1,42 \text{ kV/mm} \pm 0,6 \%$  über die Beziehung  $\kappa_V = J/E$  die elektrische Leitfähigkeit berechnet. Das Ergebnis ist in Tabelle 7.1 für die verschiedenen Temperaturen aufgelistet. Bei dieser exemplarisch ausgewählten Feldstärke variiert die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit über mehr als zwei Dekaden. Der Bereich der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit im Volumen des Werkstoffs liegt für die angestrebte Anwendung als Isolierwerkstoff für DC-GIS insgesamt zu hoch. Die im Versuch gewählte Feldstärke hingegen ist gering, sie liegt deutlich unterhalb des anvisierten Betriebsfeldstärkebereichs. Als besonders kritisch in Verbindung mit der hohen Temperaturabhängigkeit ist vor allem das scharfe Abknicken der Mikrovaristor-Kennlinie oberhalb der Schaltpunktfeldstärke

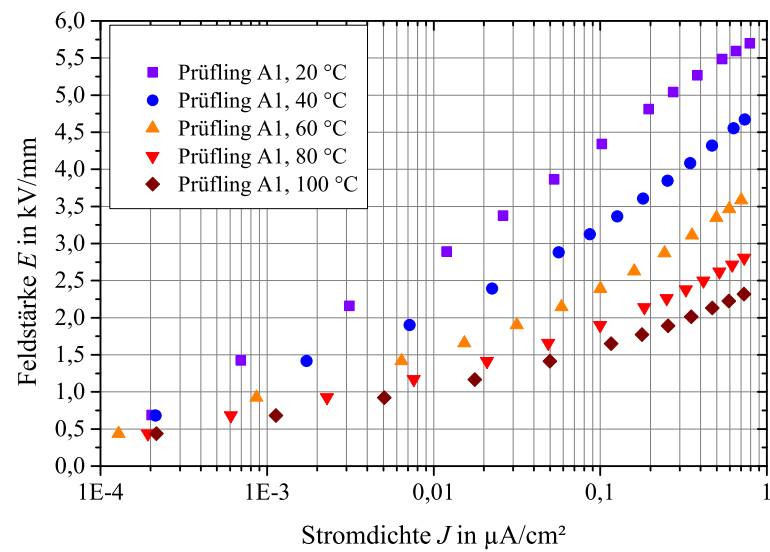


Abbildung 7.8: Temperaturabhängige  $E$ - $J$ -Kennlinien des Epoxidharz-Prüflings *A1* mit einem Mikrovaristorpulveranteil von 80 % aus dem oberen Bereich des zylindrischen Prüflings [Kar 2011]

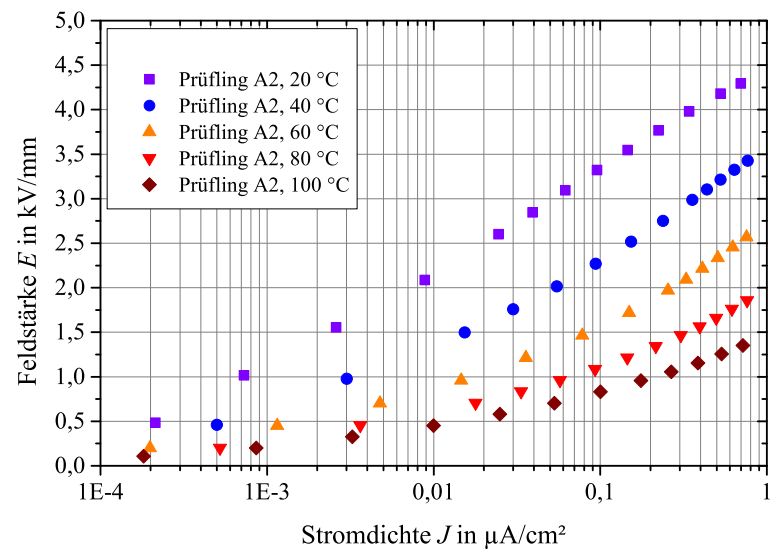


Abbildung 7.9: Temperaturabhängige  $E$ - $J$ -Kennlinien des Epoxidharz-Prüflings *A2* mit einem Mikrovaristorpulveranteil von 85 % aus dem unteren Bereich des zylindrischen Prüflings [Kar 2011]

zu bewerten. Hierdurch könnten bei hohen Temperaturen sehr hohe elektrische Leitfähigkeiten erreicht werden.

Tabelle 7.1: Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$  des Prüflings A1 bei  $E = 1,42 \text{ kV/mm} \pm 0,6 \%$

$\vartheta$ in $^{\circ}\text{C}$	$J$ in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$E$ in $\text{V}/\text{mm}$	$\kappa_V$ in $\text{S}/\text{m}$
20	0,000696	1425	$4,89 \cdot 10^{-12}$
40	0,00173	1416	$1,22 \cdot 10^{-11}$
60	0,00642	1416	$4,53 \cdot 10^{-11}$
80	0,02094	1414	$1,48 \cdot 10^{-10}$
100	0,04979	1412	$3,53 \cdot 10^{-10}$

Ein vergleichbares Verhalten in der Temperaturabhängigkeit zeigen auch die Prüflinge der Charge B, bei welchen die generell höhere Leitfähigkeit der Charge, ebenso errechnet aus den Werten bei einer Feldstärke von etwa  $1,45 \text{ kV/mm}$ , von  $1,7 \cdot 10^{-12} \text{ S/m}$  bei  $20^{\circ}\text{C}$ , auf einen Wert von  $7 \cdot 10^{-10} \text{ S/m}$  bei  $100^{\circ}\text{C}$  ansteigt ( $E$ - $J$ -Kennlinien zur Temperaturabhängigkeit siehe Abbildung 7.10).

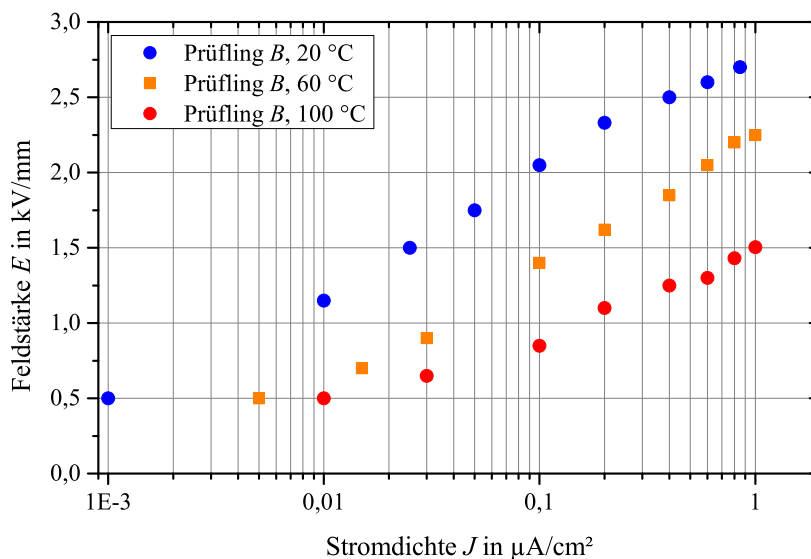


Abbildung 7.10: Temperaturabhängige  $E$ - $J$ -Kennlinien eines Epoxidharz-Prüflings der Charge B mit einem Mikrovaristoranteil von 85 % aus dem unteren Bereich des zylindrischen Prüflings

Es kann insgesamt festgestellt werden, dass die hohe Temperaturabhängigkeit der Kennlinie der in dieser Arbeit untersuchten Proben für den Einsatz in Isolierwerkstoffen negativ zu bewerten ist und drastisch reduziert werden muss. Messungen zur



Temperaturabhängigkeit von mikrovaristorgefüllten Feldsteuermaterialien finden sich auch in der Literatur [Don 2011]. Dort wurden konventionelle Mikrovaristoren für geringere Schaltpunktfeldstärken in einer Silikonmatrix temperaturabhängig vermessen. Auch bei diesen Untersuchungen wurde zunächst eine Zunahme der Leitfähigkeit im Leckstrombereich ermittelt, begründet durch die thermische Aktivierung des halbleitenden Materials. Allerdings wurde im höheren Temperaturbereich ein geringerer Einfluss auf die Kennlinie festgestellt. Der hohe thermische Ausdehnungskoeffizient von Silikon (im Vergleich zu Epoxidharz) wird als Ursache genannt. Die Ausdehnung führt zu einer Unterbrechung von leitfähigen Pfaden und wirkt der erhöhten Leitfähigkeit der Mikrovaristoren entgegen. Einen weiteren Anknüpfungspunkt bieten die Mikrovaristoren als solches: Zum einen wurden zur Erhöhung der Schaltfeldstärke die Rezeptur und Verarbeitung variiert (vgl. Abschnitt 2.5.2), zum anderen liegen diese in einer deutlich feineren Partikelgrößenverteilung als in [Don 2011] vor (vgl. Abbildung 7.2 (a) und (b)).

### **Vergleichsmessungen zur Temperaturabhängigkeit von mikrovaristorgefülltem HTV-Silikon**

Zur Klärung der Diskrepanz zwischen den Messungen der Temperaturabhängigkeit an mikrovaristorgefülltem Epoxidharz mit hohen Schaltpunktfeldstärken und den in der Literatur angeführten Ergebnissen zur Temperaturabhängigkeit werden verschiedene mikrovaristorgefüllte HTV-Silikonprüflinge temperaturabhängig vermessen. Analog zu den Untersuchungen am gefüllten Epoxidharz wird hierbei die Kennlinie unterhalb der Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  betrachtet. Durch einen Industriepartner wurden HTV-Silikonprüflinge mit einer Dicke von 2 mm hergestellt, welche mit verschiedenen Mikrovaristoren gefüllt sind. Prüfling HTV-L1 und HTV-L2 sind mit sphärischen Mikrovaristoren gefüllt, welche eine besonders niedrige Schaltpunktfeldstärke  $E_b < 1 \text{ kV/mm}$  aufweisen. Die Mikrovaristoren des Prüflings HTV-L2 wurden vor der Einmischung in das HTV-Silikon zusätzlich mittels Silanisierung<sup>5</sup> vorbehandelt. Die Mikrovaristoren des Prüflings HTV-L1 wurden ohne Vorbehandlung in das HTV-Silikon eingemischt. Prüfling HTV-L3 ist mit unbehandelten, sphärischen Mikrovaristoren mit einem  $E_b \approx 1 \text{ kV/mm}$  gefüllt. In Prüfling HTV-L4 sind

---

<sup>5</sup>Durch die Silanisierung von Füllstoffen wird eine Haftvermittlung und eine bessere Vernetzung zwischen Füllstoff und Polymermatrix angestrebt, welche die mechanischen und auch elektrischen Eigenschaften an der Grenzfläche Polymer-Füllstoffpartikel verbessern soll.

Mikrovaristoren der Charge A (ohne Vorbehandlung) eingemischt, also dieselben Mikrovaristoren, welche auch im Epoxidharz verwendet werden.

Die Messungen der Temperaturabhängigkeit der Prüflinge HTV-L1 und HTV-L2 (Abbildung 7.11) zeigen bis etwa 80 °C das in [Don 2011] beschriebene temperaturunabhängige Verhalten. Hierbei sind kaum Unterschiede zwischen der silanisierten und der nicht-silanisierten Variante der eingemischten Mikrovaristoren feststellbar. Bei 100 °C hingegen ist eine deutliche Verschiebung der Kennlinie in Richtung höherer Feldstärken, also eine Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit erkennbar. Offenbar dominiert hier die thermische Ausdehnung des HTV-Silikonprüflings, und die leitfähigen Ketten der Mikrovaristoren werden teilweise aufgetrennt. Dieses Verhalten ist, entgegen der Erwartung, im Falle der silanisierten Variante des Prüflings stärker ausgeprägt.

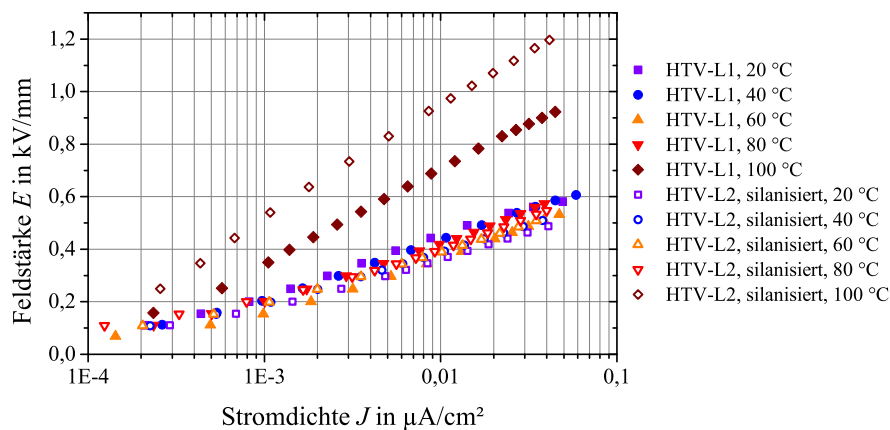


Abbildung 7.11: Temperaturabhängige  $E$ - $J$ -Kennlinien der mikrovaristorgefüllten HTV-Silikon-Prüflinge HTV-L1 (unbehandelte Mikrovaristoren) und HTV-L2 (silanisierte Mikrovaristoren) [Kar 2011].

Ein generell ähnliches Temperaturverhalten ist auch bei Prüfling HTV-L3 feststellbar (Abbildung 7.12), wobei dieser Prüfling bei Stromdichten  $>0,01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  und niedrigen Temperaturen eine leichte Verschiebung der Kennlinie in Richtung höherer Feldstärken zeigt.

Völlig gegensätzlich zu den bisherigen Messergebnissen am mikrovaristorgefülltem HTV-Silikon ist hingegen das Temperaturverhalten von Prüfling HTV-L4, welcher mit den Hochfeld-Mikrovaristoren der Charge A gefüllt wurde (Abbildung 7.13). Hier wird eine Verschiebung der Kennlinien bei zunehmender Temperatur in Richtung

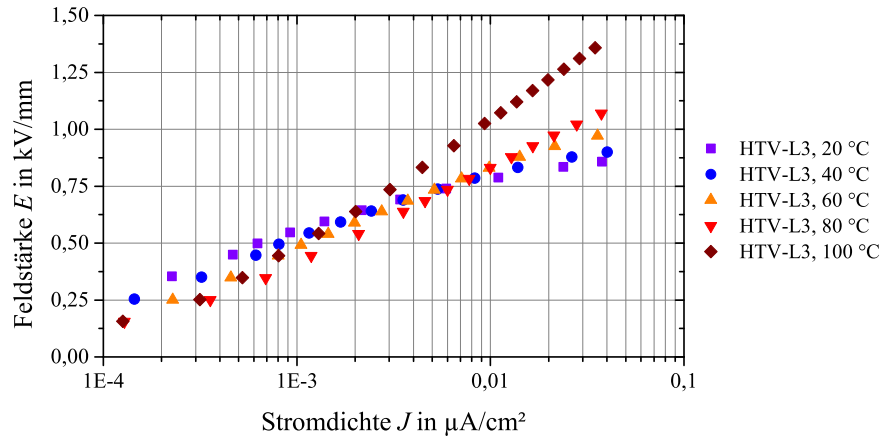


Abbildung 7.12: Temperaturabhängige  $E$ - $J$ -Kennlinien des mikrovaristorgefüllten HTV-Silikon-Prüflings HTV-L3 [Kar 2011].

niedrigerer Feldstärken festgestellt, also eine Zunahme der Leitfähigkeit. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Messungen der Temperaturabhängigkeit der mit denselben Mikrovaristoren gefüllten Epoxidharz-Prüflinge. Allerdings ist die Verschiebung der Kennlinie des HTV-Silikonprüflings HTV-L4 weniger stark ausgeprägt. Es ist anzunehmen, dass dies der höheren thermischen Ausdehnung der HTV-Silikonmatrix geschuldet ist, welche der Zunahme der Leitfähigkeit entgegenwirkt. Dies könnte auch ein Erklärungsansatz für die abknickende Kennlinie bei 100 °C sein, da auch bereits bei den Prüflingen HTV-L1 bis L3 eine analoge Abweichung bei 100 °C feststellbar ist.

Neben den Prüflingen, welche eigens durch den Industriepartner für die Messungen hergestellt wurden, sind auch Messungen der Temperaturabhängigkeit an einem weiteren HTV-Silikonkautschuk durchgeführt worden, welches ein  $E_b$  von 1 kV/mm aufweist. Hierbei wird eine sehr starke Temperaturabhängigkeit der  $E$ - $J$ -Kennlinie festgestellt, welche mit zunehmender Temperatur stark in Richtung höherer Feldstärken verschoben wird und demzufolge bei hohen Temperaturen eine deutlich geringere Leitfähigkeit ergibt (Abbildung 7.14). Bei  $\vartheta = 100$  °C beträgt die Schaltpunktfeldstärke der Kennlinie  $E_b > 2,5$  kV/mm.

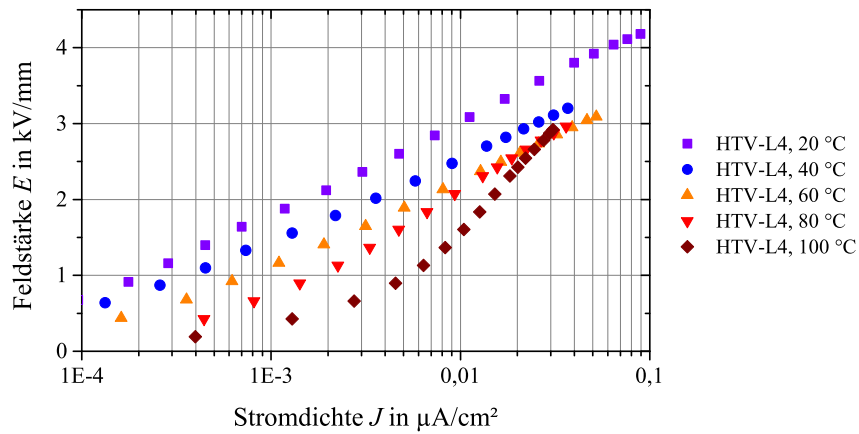


Abbildung 7.13: Temperaturabhängige  $E$ - $J$ -Kennlinien des mit Hochfeld-Mikrovaristoren (Charge A) gefüllten HTV-Silikon-Prüflings [Kar 2011].

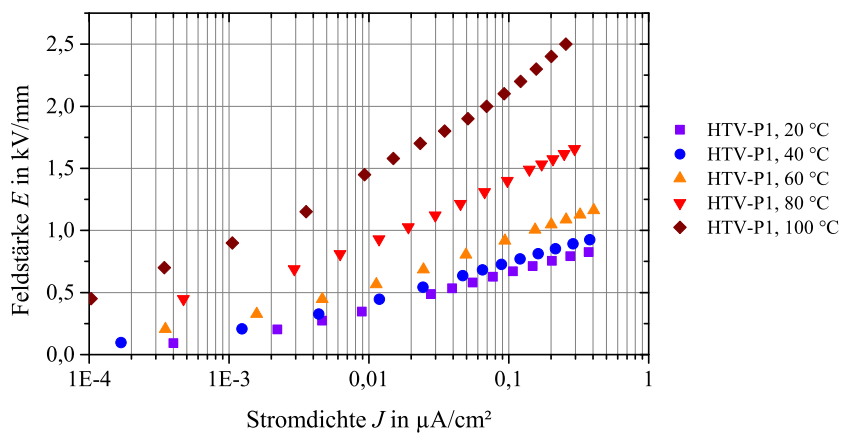


Abbildung 7.14: Temperaturabhängige  $E$ - $J$ -Kennlinien eines kommerziell verfügbaren, mikrovaristorgefüllten HTV-Silikonprüflings [Kar 2011].

## Einfluss der thermischen Ausdehnung der gefüllten Polymere

Unter Verwendung eines Hochtemperatur-Dilatometers<sup>6</sup> (Abbildung 7.15) wird die thermische Ausdehnung der verschiedenen, mikrovaristorgefüllten Werkstoffe messtechnisch ermittelt. Es werden an jeweils zehn Prüflingen aus mikrovaristorgefülltem HTV-Silikon ( $E_b = 1 \text{ kV/mm}$ ), mikrovaristorgefülltem Epoxidharz (Hochfeld-Mikrovaristoren der Charge A) sowie an HTV-Silikon ohne Füllstoff eine Messung im Temperaturbereich von  $30^\circ\text{C}$  bis  $150^\circ\text{C}$  durchgeführt. Die Einspannkraft in der Prüflingsaufnahme beträgt  $0,5 \text{ N}$ .

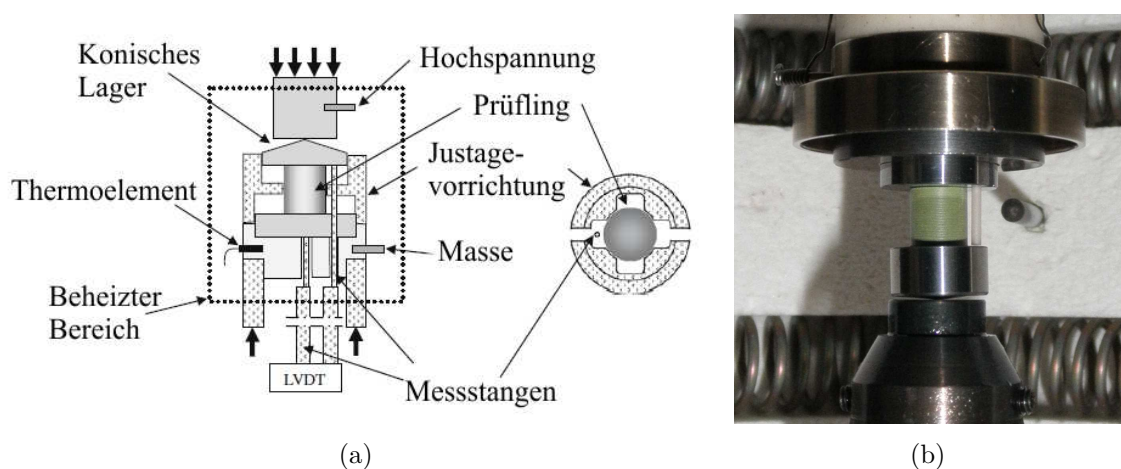


Abbildung 7.15: (a) Prinzip-Skizze des verwendeten Hochtemperatur-Dilatometers zur Messung der thermischen Längenausdehnung von Werkstoffproben (Bild nach [Web 2009], ©2009 Acta Materialia Inc., published by Elsevier Ltd.); (b) Foto der Messanordnung mit eingebrachtem Prüfling aus mikrovaristorgefülltem Epoxidharz [Kar 2011].

Das Ergebnis dieser Untersuchung (Abbildung 7.16) zeigt, dass ungefülltes HTV-Silikon die stärkste thermische Längenausdehnung erfährt. Bei mikrovaristorgefülltem HTV-Silikon ist diese deutlich geringer als beim ungefülltem HTV-Silikon, jedoch gleichzeitig wesentlich höher als bei mikrovaristorgefülltem Epoxidharz, welches bei  $130^\circ\text{C}$  lediglich um  $0,13 \%$  thermisch ausgedehnt wird. Die negative Ausdehnung des mikrovaristorgefüllten Epoxidharzes ab etwa  $140^\circ\text{C}$  ist mit dem Erreichen der Glasübergangstemperatur  $T_G$  begründbar, d.h. der Werkstoff erweicht und wird durch die Vorspannkraft zusammengestaucht.

<sup>6</sup>Mit freundlicher Unterstützung von Herrn Dr. Kyle G. Webber, Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe, Technische Universität Darmstadt.

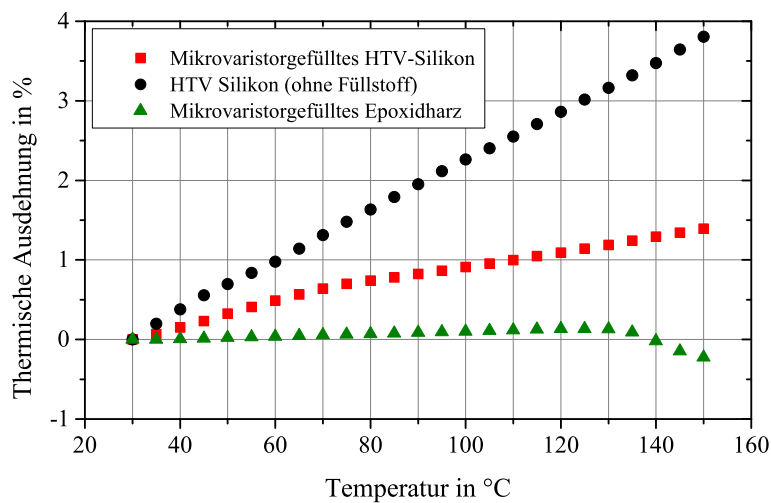


Abbildung 7.16: Ergebnis der Ausdehnungsmessung an mikrovaristorgefülltem HTV-Silikon, mikrovaristorgefülltem Epoxidharz sowie an ungefülltem HTV-Silikon. Dargestellt ist die mittlere Ausdehnung in Prozent, gemessen an jeweils zehn Prüflingen [Kar 2011].

Anhand dieser Messergebnisse können die gemessenen, temperaturabhängigen Kennlinien erklärt werden. Zwar ist die thermische Ausdehnung von mikrovaristorgefülltem HTV-Silikon mit knapp 1 % bei Aufwärmung von 30 °C auf 100 °C vergleichsweise gering, aber offenbar ausreichend, um die leitfähigen Ketten zwischen den einzelnen Mikrovaristor-Partikeln in der HTV-Silikonmatrix zunehmend zu unterbrechen. Dies führt zu einer Verschiebung der  $E$ - $J$ -Kennlinie in Richtung höherer elektrischer Feldstärken. Dieser Effekt dominiert offenbar bei HTV-Silikon, gefüllt mit sphärischen Mikrovaristoren (vgl. Abbildung 7.11 und Abbildung 7.14). Es wird angenommen, dass bei HTV-Silikon, welches mit vermahlenen Mikrovaristoren gefüllt wurde, deutlich mehr leitfähige Ketten vorliegen und die thermische Ausdehnung des HTV-Silikons weniger Ketten unterbricht (Abbildung 7.13). Eine analoge Annahme für Epoxidharz erklärt auch die stärker ausgeprägte Verschiebung der  $E$ - $J$ -Kennlinie zu niedrigeren Feldstärken bei Epoxidharz, gefüllt mit vermahlenen Mikrovaristoren (Abbildung 7.9). Dort werden offenbar nahezu keine leitfähigen Ketten unterbrochen, da verglichen zu HTV-Silikon nur eine sehr geringe thermische Ausdehnung eintritt.

### 7.1.4 Hochspannungsversuche

#### Versuche mit Gleichspannungsbeanspruchung

Unter Verwendung des mittleren Abschnitts von Prüfling A2 werden an einem zylindrischen Stab<sup>7</sup> Hochspannungsversuche bei Gleichspannung in SF<sub>6</sub> bei  $p = 0,4$  MPa durchgeführt. Die Prüfspannung wird in Schritten von  $\Delta U = 20$  kV alle 120 s erhöht und der Gesamtstrom  $I$  durch den Prüfling kontinuierlich aufgezeichnet<sup>8</sup> (vgl. Abbildung 7.17). Die Messung wird bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C durchgeführt. Anhand des im Diagramm dargestellten Stromverlaufs (blau) zu den jeweiligen Spannungsstufen (schwarz) ist die Nichtlinearität des Werkstoffs und insbesondere die starke Zunahme des Stroms bei hohen Spannungen gut erkennbar.

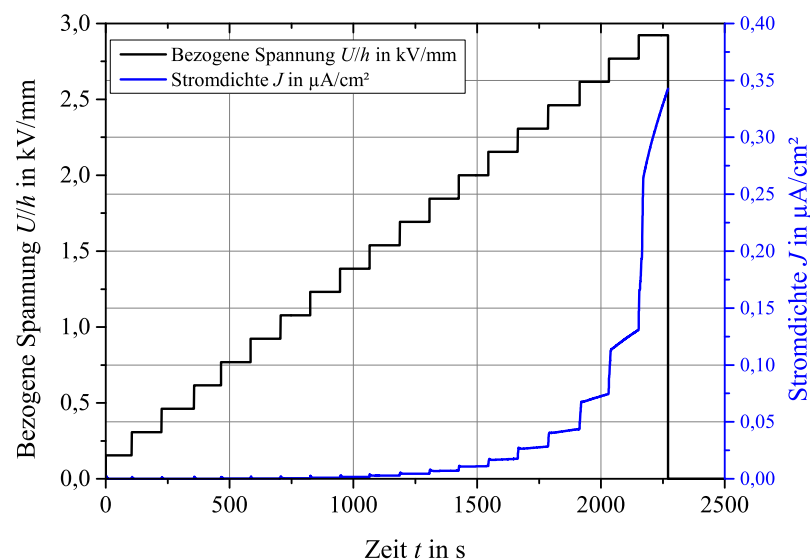


Abbildung 7.17: Diagramm zur Gleichspannungs-Messung im Hochspannungsversuchsaufbau des mikrovaristorgefüllten Epoxidharz-Prüflings A2, dargestellt als bezogene Spannung  $U/h$  (schwarz) bzw. Stromdichte  $J$  (blau) über der Zeit  $t$ . Im Versuch wurde die Spannung in 20-kV-Schritten gesteigert.

Zudem ist sichtbar, dass sich bei geringen Spannungsniveaus der zeitliche Verlauf des Stroms über die Messdauer etwa konstant verhält, wohingegen insbesondere bei

<sup>7</sup>Eine detaillierte Darstellung des Prüflings findet sich in Abschnitt 6.2.2

<sup>8</sup>Bei sämtlichen Prüfungen im Hochspannungsaufbau wird stets der durch den Prüfling fließende Gesamtstrom (Oberflächenstrom und Volumenstrom) gemessen, da der verwendete Prüfling eine Differenzierung zwischen Volumen- und Oberflächenstrom nicht zulässt.

den letzten vier Spannungsstufen der Strom im zeitlichen Verlauf einer Stufe einen stetigen Anstieg aufweist. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Prüfspannung. Offenbar ist eine Erwärmung des Prüflings und somit eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit die Ursache (vgl. Temperaturabhängigkeit Abschnitt 7.1.3). Mittels Infrarot-Thermografien während der Prüfung kann die Erwärmung nachgewiesen werden: Ab einem Gesamtstrom von etwa  $1\text{ }\mu\text{A}$  kann ein erstes Aufwärmen des Prüflings festgestellt werden. Die an der Oberfläche gemessene Erwärmung ist bei einem Strom von  $1\text{ }\mu\text{A}$  nach 120 s gerade durch die IR-Kamera messbar, es werden etwa  $0,5\text{ K}$  gemessen<sup>9</sup>. Zum Ende der letzten angelegten Spannungsstufe hat die IR-Messung einen Wert von  $1\text{ K}$  überschritten (Abbildung 7.18 (a)).

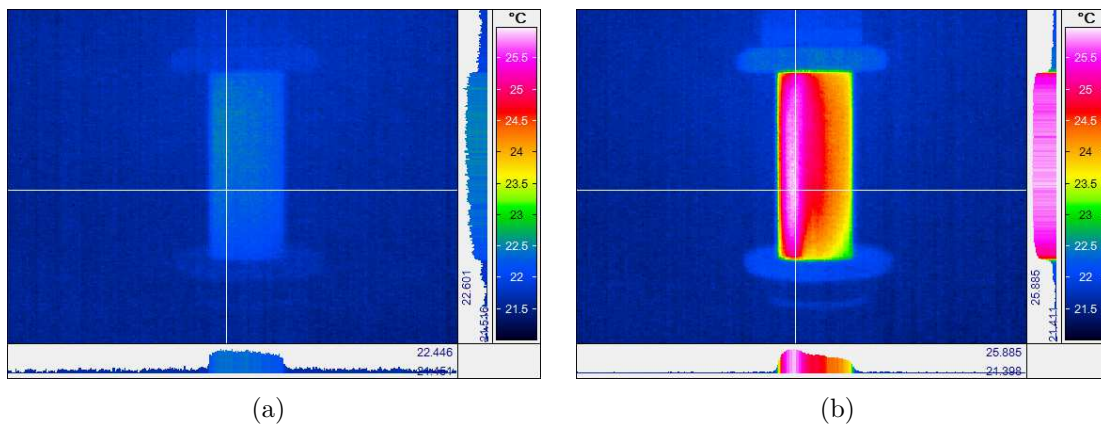


Abbildung 7.18: Infrarot-Thermografieaufnahmen<sup>9</sup> während eines Hochspannungsversuchs unter  $\text{SF}_6$  ( $p = 0,4\text{ MPa}$ ) bei Gleichspannungsbeanspruchung: (a) Aufnahme 5 Minuten nach Erreichen einer Stromdichte von  $1\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; (b) Aufnahme 1 Minute nach Erreichen einer Stromdichte von  $5\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Bei einer weiteren Erhöhung der Spannung und höheren Prüfstromdichten wird deutlich, dass sich an bestimmten Stellen des Prüflings eine stärkere Erwärmung von mehreren Kelvin ausbildet (Abbildung 7.18 (b)), offenbar ist in diesem Bereich eine besonders leitfähige Kette an Mikrovaristor-Füllstoffpartikeln im Epoxidharz vorhanden. Die tatsächliche Temperatur der leitfähigen Pfade, welche möglicherweise im Inneren des Zylinders vorliegen, könnten deutlich höher sein als die an der Oberfläche mittels Infrarot-Thermografie gemessenen Temperaturen. Eine weitere Erklärungsmöglichkeit für die mit der Zeit zunehmenden Ströme sind die im späteren

<sup>9</sup>Es handelt sich um eine rein qualitative Messung, die tatsächliche Temperatur am Prüfling ist höher, da bei dieser Messung keine Korrektur der Dämpfung des IR-Spektrums durch das verwendete Isoliergas  $\text{SF}_6$  berücksichtigt wurde.



Verlauf dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse zum Langzeitverhalten der Hochfeld-Mikrovaristoren (Abschnitt 7.1.5), welche eine generelle kontinuierliche Zunahme der Stromdichte  $J$  im Falle der Hochfeld-Mikrovaristoren zeigen.

Unter Verwendung von Mikrovaristoren der Charge  $A$  kann lediglich ein zylindrischer Prüfling in Hochspannungsversuchen vermessen werden (aufgrund der geringen Herstellungsmenge der Charge  $A$ ). Allerdings werden weitere Prüflinge der Mikrovaristoren aus Charge  $B$  und  $C$  untersucht. Aufgrund der unterschiedlichen Struktur und Rezeptur der verschiedenen Chargen zeigen die Messergebnisse abweichende Gleichspannungskennlinien in den Hochspannungsversuchen (siehe Abbildung 7.19 bzw. Ergebnisse in logarithmischer Darstellung Abbildung 7.20).

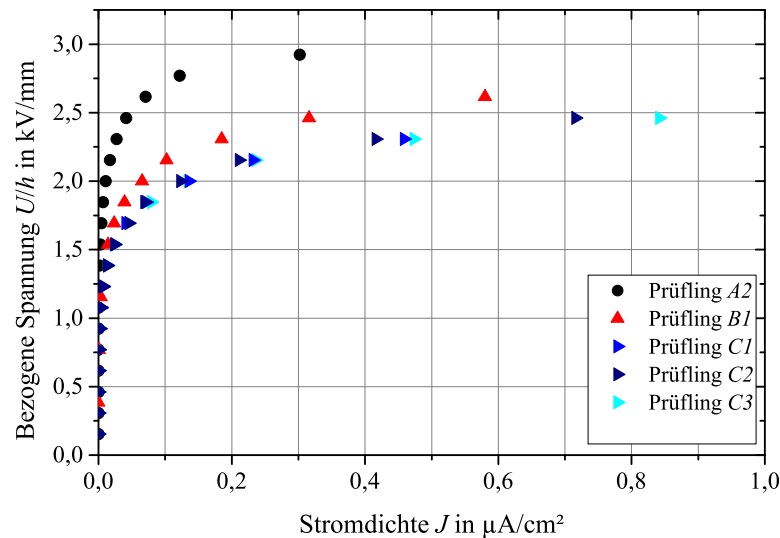


Abbildung 7.19: Kennlinien der Prüflinge gefüllt mit Mikrovaristoren der Chargen  $A$ ,  $B$  und  $C$ , Messpunkte ermittelt anhand der Auswertung der gemittelten Messdaten gemäß Abbildung 7.17

Durch Einflussnahme auf die Rezeptur wird offenbar mit wachsender Partikelgröße die Schaltpunktspannung der Chargen  $B$  und  $C$  etwas reduziert. Dieses Ergebnis der Gleichspannungsprüfung im gasisolierten Versuchsaufbau deckt sich generell mit den Untersuchungen zu den elektrischen Kennlinien der verschiedenen Chargen (Abschnitt 7.1.2). Die Prüflinge der Charge  $C$  weisen im Hochspannungsversuch etwas geringere Schaltpunktfeldstärken auf, im Vergleich zur Kennliniencharakterisierung (Abbildung 7.6). Dies wird auf die Streuung der Kennlinien der Prüfkörper

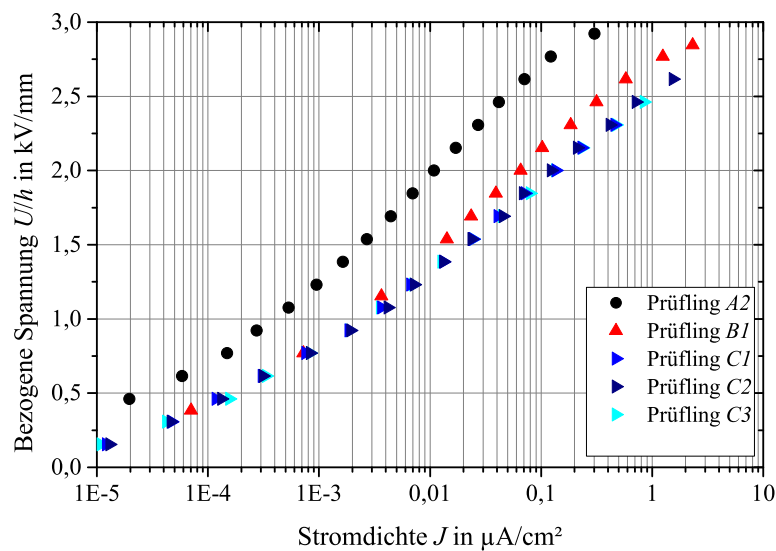


Abbildung 7.20: Halblogarithmische Kennliniendarstellung der Prüflinge gefüllt mit Mikrovaristoren der Chargen A, B und C. Die Messpunkte wurden anhand der Auswertung von Messdaten gemäß Abbildung 7.17 ermittelt.

zurückgeführt. Außerdem weisen hier die Prüflinge der Charge, C eine geringere Schaltpunktfeldstärke auf als der Prüfkörper der Charge B. Allerdings kann auch lediglich ein Prüfkörper der Charge B in Hochspannungsversuchen vermessen werden, aufgrund der geringen produzierten Menge dieser Mikrovaristor-Charge.

## Versuche mit Stoßspannungsbeanspruchung

Nach Abschluss der Gleichspannungsuntersuchungen werden die Prüflinge (Abbildung 7.21 (a)) im Hochspannungsaufbau einer Blitzstoßspannungsprüfung unterzogen. Hierbei wird zu Beginn der zweiten Prüfung der Scheitelwert  $\hat{u}_{\text{Blitz}}$  der genormten 1,2/50-µs-Prüfspannung deutlich unterhalb der erwarteten Versagensspannung (auf Grundlage eines Vorversuchs) gewählt. Pro Scheitelwertsstufe  $\hat{u}_{\text{Blitz}}$  wird der Prüfling mit zehn Stößen belastet und die Spannung anschließend in Stufen von  $\Delta\hat{u}_{\text{Blitz}} = 5 \text{ kV}$  erhöht. Das Erreichen der Versagensspannung  $\hat{u}_{\text{Blitz, Versagen}}$  führt in allen Fällen zu einer irreversiblen Zerstörung des Prüflings (vgl. Abbildung 7.21 (b)). Bei allen Prüflingen ist ein elektrischer Durchschlag im Volumen ursächlich, dies führt zu einem Aufbrechen des Prüflings. Offenbar findet beim Versagenspegel ein

thermischer Durchschlag statt, verursacht durch das Erreichen einer hohen Leitfähigkeit der Mikrovaristoren. Bei keinem Prüfling wurde ein Überschlag entlang der Oberfläche festgestellt.

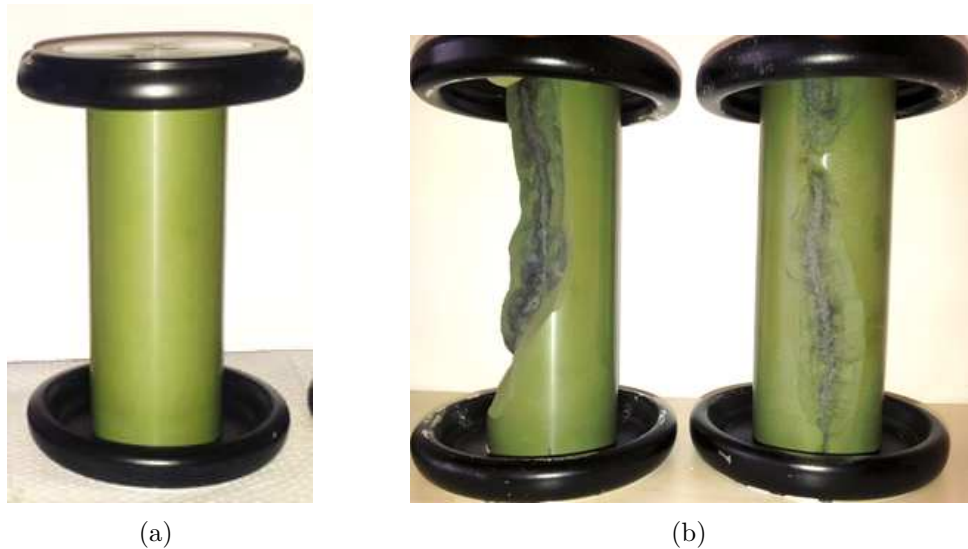


Abbildung 7.21: Prüfkörper der Hochspannungsversuche: (a) Foto eines Prüfkörpers vor Versuchsbeginn; (b) Zwei Prüflinge nach Versagen in der Blitzstoßspannungsprüfung, jeweils mit deutlich erkennbarem Entladungskanal im Volumen des Prüfkörpers.

Tabelle 7.2 listet die derart ermittelte Versagensspannung  $\hat{u}_{\text{Blitz, Versagen}}$  der drei untersuchten Prüflinge aus den Chargen *A*, *B* und *C* auf. Als vergleichender Kennwert aus der Gleichspannungsprüfung ist der gemessene Strom  $I$  bei  $U = 200 \text{ kV}$  (DC) aufgeführt. Bei Prüfling *B1* und *C1* zeigt sich im Ergebnis der Stoßspannungsprüfung der selbe Trend in Relation zu den erreichten Stromdichten bei  $U = 200 \text{ kV}$  (DC), d.h. die Prüflinge mit höheren Stromdichten im Gleichspannungsversuch versagen bei niedrigeren Scheitelwerten der Blitzstoßspannungsprüfung. Prüfling *A2* versagt hingegen bei einem Stoßspannungspegel unterhalb des erwarteten Wertes, obwohl dieser Prüfling in der Gleichspannungsprüfung die geringste Stromdichte aufwies (vgl. Tabelle 7.2). Diese Diskrepanz könnte möglicherweise auf eine Inhomogenität im Prüfkörper zurückgeführt werden oder auf eine zu starke Vorbeanspruchung in den vorhergegangenen Gleichspannungsversuchen. Es gilt zu betonen, dass jeweils nur ein mikrovaristorgefüllter Epoxidharz-Prüfling je Pulver-Charge mit Blitzstoßspannung beansprucht wurde und die Versuche für eine statistisch verwertbare Aussage mit deutlich höheren Stückzahlen wiederholt werden müssen. Allerdings zeigen diese

Tabelle 7.2: Versuchsergebnisse der Prüfung mit Blitzstoßspannungsbeanspruchung (1,2/50  $\mu$ s)

Prüfling	Strom $I$ bei $U = 200$ kV (DC)	$\hat{u}_{\text{Blitz, Versagen}}$
Charge A, Prüfling A2	45 nA	490 kV
Charge B, Prüfling B1	200 nA	570 kV
Charge C, Prüfling C1	450 nA	500 kV

ersten Ergebnisse ein generelles Verhalten derart gefüllter Epoxidharz-Prüflinge auf.

An mehreren Prüfkörpern der Charge C wird in vergleichbarer Weise die Versagensspannung  $\hat{u}_{\text{Schalt, Versagen}}$  bei genormter Schaltstoßbeanspruchung (250/2500  $\mu$ s) ermittelt (Tabelle 7.3). Analog zum Versuchsergebnis bei Blitzstoßspannungsbeanspruchung führt die Versagensspannung  $\hat{u}_{\text{Schalt, Versagen}}$  auch hier in allen Fällen zu einem Durchschlag und folglich zu einer irreversiblen Zerstörung der Prüflinge. Die ermittelten Werte  $\hat{u}_{\text{Schalt, Versagen}}$  der ersten vier Prüfkörper liegen hierbei dicht aneinander.

Tabelle 7.3: Versuchsergebnisse der Prüfung mit Schaltstoßspannungsbeanspruchung (250/2500  $\mu$ s)

Prüfling	Strom $I$ bei $U = 200$ kV (DC)	$\hat{u}_{\text{Schalt, Versagen}}$
Charge C, Prüfling C1	383 nA	514 kV
Charge C, Prüfling C2	392 nA	520 kV
Charge C, Prüfling C3	379 nA	505 kV
Charge C, Prüfling C4	524 nA	504 kV
Charge C, Prüfling C5	754 nA	423 kV

Prüfling C5 wurde bereits bei einer geringeren Schaltstoßbeanspruchung zerstört, zeigte allerdings auch bei der vorhergegangenen Gleichspannungsprüfung deutlich erhöhte Stromwerte in Relation zu den Prüflingen C1 bis C4 auf. Mit Ausnahme des Prüflings C5 zeigen die Versagens-Pegel bei Schaltstoßspannung im Vergleich zu den Blitzstoßspannungsprüfungen keine geringeren Werte auf. Dies wäre im Falle eines thermisch initiierten Durchschlags allerdings zu erwarten gewesen, da die Schaltstoßspannungsprüfung einen im Vergleich zur Blitzstoßspannungsprüfung deutlich höheren Energieeintrag in den Prüfling bewirkt. Möglicherweise sind andere Ursachen für die Ausbildung eines elektrischen Durchschlags ausschlaggebend. Denkbar ist z.B. ein dielektrisch initiiertes Durchschlag aufgrund einer unzureichenden Einbindung

der Füllstoffpartikel in die Polymermatrix. Um dies zu klären, sollte in Folgeuntersuchungen der Einsatz von silanisierten Mikrovaristoren<sup>10</sup>, welche eine bessere Verbindung zur Polymer-Matrix ermöglichen könnten, geprüft werden. Außerdem sollte zur Sicherstellung einer hohen statistischen Signifikanz eine ausreichend hohe Anzahl an Prüfkörpern untersucht werden.



Abbildung 7.22: (a) Blick in den GIS-Prüfaufbau nach Abschluss der Schaltstoßspannungsprüfung; (b) Foto der Prüfkörper-Bruchstücke nach Abschluss der Prüfung mit Schaltstoßspannung. Im Vergleich zur Blitzstoßspannungsprüfung ist nicht nur ein Teil der zylindrischen Prüfkörper abgeplatzt, sondern jeweils der gesamte Prüfling in viele Bruchstücke zersprungen. Der Entladungskanal im Volumen der Prüfkörper (dunkel) ist klar erkennbar.

Das Schadensbild der Prüfkörper ist prinzipiell ähnlich dem der Prüflinge aus der Blitzstoßspannungsprüfung, jedoch sind die Prüflinge in noch mehr Bruchstücke zerrissen, und es bleibt kein 'Zylinderrest' zurück (vgl. Abbildung 7.22). Dies kann mit dem höheren Energieeintrag aufgrund der größeren Zeitdauer der Schaltstoßspannungsimpulse begründet werden.

Eine Klassifizierung der Ergebnisse in Bezug auf die Schaltpunktfeldstärke  $E_b$ , welche mit dem Erreichen einer Stromdichte von  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  bei etwa bei  $U = 300 \text{ kV}$  im Falle der Prüflinge  $C1$  bis  $C4$  vorliegt, erscheint sinnvoll. Demzufolge entspricht der Betriebspunkt  $200 \text{ kV}$ , bei welchem zuletzt ein nahezu konstanter Strom  $I$  im

<sup>10</sup>Durch die Silanisierung von Füllstoffen wird eine Haftvermittlung und eine bessere Vernetzung zwischen Füllstoff und Polymermatrix angestrebt, welche die mechanischen und auch elektrischen Eigenschaften an der Grenzfläche Polymer-Füllstoffpartikel verbessern soll. Der Prozess der Silanisierung wird in mikrovaristorgefüllten HTV-Silikon bereits erfolgreich angewendet.

Hochspannungsversuch festgestellt wurde und die Stromdichten gemäß Tabelle 7.3 akzeptabel in Bezug auf Verluste erscheinen, einem Wert von  $0,66 \cdot E_b$  und könnte einen möglichen Dauer-Arbeitspunkt bei Normalbetrieb mit Gleichspannung darstellen. Der Versagens-Pegel der Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfung, jeweils rund 500 kV, beträgt demzufolge  $1,66 \cdot E_b$ .

Betrachtet man die gewonnenen Ergebnisse zum Kurzzeitverhalten hinsichtlich der Anwendung des mikrovaristorgefüllten Werkstoffs als Isolatormaterial für DC-GIS, so kann die folgende, einfache Skalierung zur groben Abschätzung vorgenommen werden:

- Skalierung des stabilen Betriebspunktes  $0,66 \cdot E_b$  (in den Versuchen 200-kV-DC-Prüfspannung) auf eine DC-GIS-Spannung von 500 kV  $\Rightarrow$  Faktor 2,5
- Faktor 2,5 auf 130 mm Prüflings-Schlagweite angewendet  $\Rightarrow$  325 mm
- Faktor 2,5 auf 500 kV Stoßspannungspegel angewendet  $\Rightarrow$  1250 kV

Diese Skalierung zeigt zunächst realistische Abmessungen von 325 mm Schlagweite des Isolators auf. Der hochskalierte Stoßspannungs-Versagenspegel von 1250 kV ist allerdings zu gering. Möglicherweise geforderte Blitzstoßspannungs-Prüfpegel könnten im Falle der 500 kV-DC-GIS bei 1425 kV oder 1550 kV angenommen werden<sup>11</sup>. Weiterhin muss beachtet werden, dass die Versagenspegel weit oberhalb der geforderten Prüfpegel liegen müssen, da bei einer nicht selbstheilenden Isolierung kein Durchschlagrisiko bestehen darf. Bei einem geforderten Blitzstoßspannungs-Prüfpegel von 1425 kV müsste bereits für konventionelle Isolation bis zu  $\sigma = 9\%$  als Standardabweichung des Wertes der 50 %-Durch-/Überschlagsspannung gemäß [IEC 60071-2] angesetzt werden. Die 0 %-Durch-/Überschlagsspannung für nicht selbstheilende Isolation kann unter Verwendung eines Abstandes von  $3 \cdot \sigma$  nach Gleichung 7.1 ermittelt werden. Hieraus ergibt sich, bei Annahme von 1425 kV als 0 %-Durch-/Überschlagsspannung, ein 50 %-Durch-/Überschlagsspannungswert von 1952 kV (Gleichung 7.2).

$$U_0 = U_{50} - 3 \cdot \sigma \cdot U_{50} = 0,73 \cdot U_{50} \quad (7.1)$$

$$U_{50} = U_0 / 0,73 = 1,37 \cdot U_0 = 1425 \text{ kV} \cdot 1,43 = 1952 \text{ kV} \quad (7.2)$$

---

<sup>11</sup>Diese Werte entsprechen den in [IEC 60071-1] genannten Prüfpegeln eines Betriebsmittels für  $U_m = 550 \text{ kV}$ . Bei einem japanischen Prototypen einer 500-kV-DC-GIS wurden  $\pm 1300 \text{ kV}$  Blitzstoßspannungsprüfung und  $\pm 1175 \text{ kV}$  Schaltstoßspannungsprüfung sowie  $\pm 750 \text{ kV}$  DC-Stehspannung spezifiziert [Has 1997], [Cig 2012a].

Dies würde, angewendet auf die gemessenen Versagensstoßspannung von rund 500 kV, einen Skalierungsfaktor von 3,9 bedeuten. Als Schlagweite würde sich durch den Faktor 3,9 eine Länge von 507 mm ergeben, d.h. der Wert der 50 % Durchschlagspannung ist für die Anwendung in gasisolierten Systemen noch zu gering. Selbstverständlich muss bei dieser Betrachtung davon ausgegangen werden, dass eine lineare Skalierung nur eine grobe Abschätzung liefert. Nicht berücksichtigt wird in dieser Betrachtung zudem die in gasisolierten Anlagen vorherrschende koaxiale Feldverteilung. Außerdem muss eine Sicherheitsmarge für DC-Prüfspannungen (vgl. Tabelle 4.2) und Überspannungen sowie für auftretende transiente Beanspruchungen einkalkuliert werden. Um diesen Aspekten gerecht zu werden, erscheint ein mikrovaristorgefüllter Werkstoff mit einem  $E_b \geq 6 \text{ kV/mm}$  sinnvoll. Die angefertigten Prüfkörper *A1* und *A2* haben in praktischen Versuchen gezeigt, dass dies möglich ist.

### 7.1.5 Untersuchung des Langzeitverhaltens

Unter Verwendung des Versuchsstandes für Langzeituntersuchungen (vgl. Abschnitt 5.1.2) werden jeweils 15 scheibenförmige Segmente des mit Mikrovaristoren der Charge *C* gefüllten Epoxidharzes hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens bei verschiedenen Temperaturen unter Gleichspannungsbeanspruchung vermessen. Die Erfassung der 15 Prüfströme erfolgt bei den Versuchen an mikrovaristorgefüllten Polymeren entgegen den Ausführungen in Abschnitt 5.1.2 nicht über ein Picoampèremeter mit Kanalschaltung zur abwechselnden Messung aller 15 Prüflinge, sondern über eine Spannungsmessung an Shunts (Toleranz  $\pm 0,1 \%$ ). Der Spannungsfall über alle 15 Shunts wird hierbei direkt durch die *LabVIEW* Mess- und Steuerhardware parallel erfasst (maximale Messunsicherheit:  $3,1 \mu\text{V}$ ). Die Gesamt-Messunsicherheit bei einem zu messenden Strom von 500 nA beträgt  $\pm 6,3 \%$ .

Es werden zwei Versuchsreihen mit einer Prüfdauer von jeweils 1000 Stunden an Prüflingen mit Mikrovaristoren der Charge *C* durchgeführt.

### Ergebnisse des Langzeitversuchs ohne Polaritätswechsel

Im ersten Versuch wird eine Elektrodenanordnung identisch mit der zur Bestimmung der Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$  gemäß Abbildung 6.1 (b) verwendet. Die Messingelektroden werden hierfür in der Aufnahme der Prüflinge über eine Federkonstruktion

angedrückt. Alle 15 Prüflinge sind mit einer Prüffeldstärke von 1,75 kV/mm beansprucht. Diese Prüffeldstärke wurde aufgrund von Vor-Untersuchungen gewählt und liegt deutlich unterhalb der Schaltpunktfeldstärke  $E_b$ . Die Prüflinge sind aus zwei verschiedenen zylindrischen Gusskörpern mit einem Füllgrad von 82,5 % bzw. 86 % entnommen (in beiden Fällen Mikrovaristoren der Charge  $C$ ). Abbildung 7.23 zeigt in der Gesamtübersicht die Messdaten aller 15 Stromdichten bei 30 °C (blau), 60 °C (orange) und 100 °C (rot) über der gesamten Prüfdauer von 1000 Stunden<sup>12</sup>.

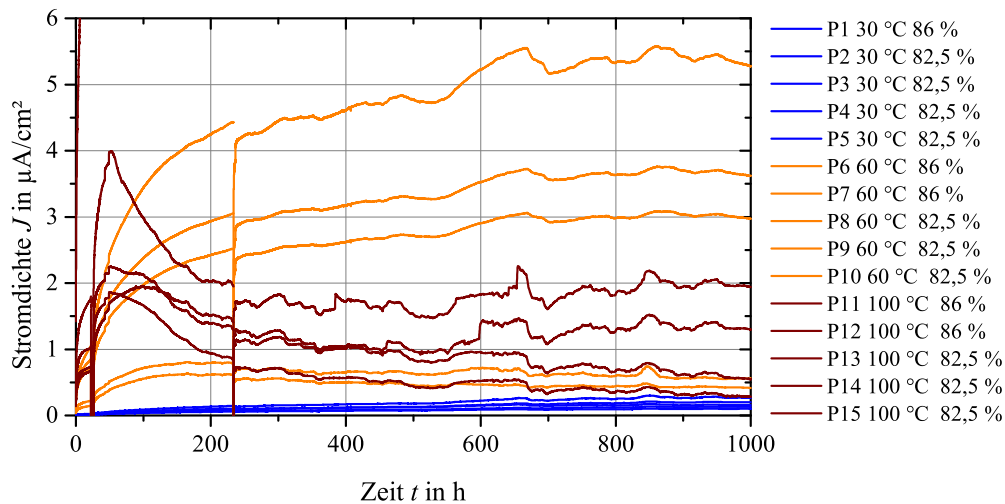


Abbildung 7.23: Gesamtergebnis des 1000-Stunden-Versuchs bei einer Feldstärke von 1,75 kV/mm. Dargestellt werden alle Prüfstromdichten der 15 Prüfkörper (Charge  $C$ ) bei den drei gewählten Prüftemperaturen 30 °C (blau), 60 °C (orange) und 100 °C (rot). Kurze Versuchsunterbrechungen bei  $t = 22$  h und  $t = 234$  h [Sec 2012]. Detaillierte Darstellungen für jede Temperatur siehe Abbildung 7.24 bis 7.26.

Nach Ablauf der 1000 Stunden werden  $E$ - $J$ -Kennlinien aller 15 Prüflinge aufgezeichnet, um diese mit den gemessenen Kennlinien vor Versuchsbeginn zu vergleichen. Zwischen dem Ende der Prüfung und der anschließenden Kennlinienmessung werden während der Wartezeit von einer Stunde alle Prüflinge kurzgeschlossen und geerdet, so dass eine etwaige Polarisierung der Prüflinge bei Erfassung der Kennlinien ausgeschlossen ist.

Generell weisen die Prüflinge bei 30 °C (blau) eine sehr geringe Stromdichte von

<sup>12</sup>Als Ursache für den Anstieg bzw. Abfall der Stromdichten an allen Prüflingen im Zeitbereich um  $T = 650$  h sowie um  $T = 830$  h konnte mittels der Luftfeuchtigkeitssensoren eine direkte Korrelation der Stromdichte mit der Luftfeuchtigkeit nachgewiesen werden. Daraufhin wurde in allen weiteren Versuchsreihen die Luftfeuchte kontrolliert.



$<0,4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  auf. In Abbildung 7.24 zeigt die Darstellung der Prüflinge bei  $30^\circ\text{C}$  in anderer Skalierung der Stromdichte, dass auch diese über die gesamte Prüfdauer kontinuierlich ansteigt, sich aber gegen Ende der 1000 Stunden einem stabilen Endwert annähert.

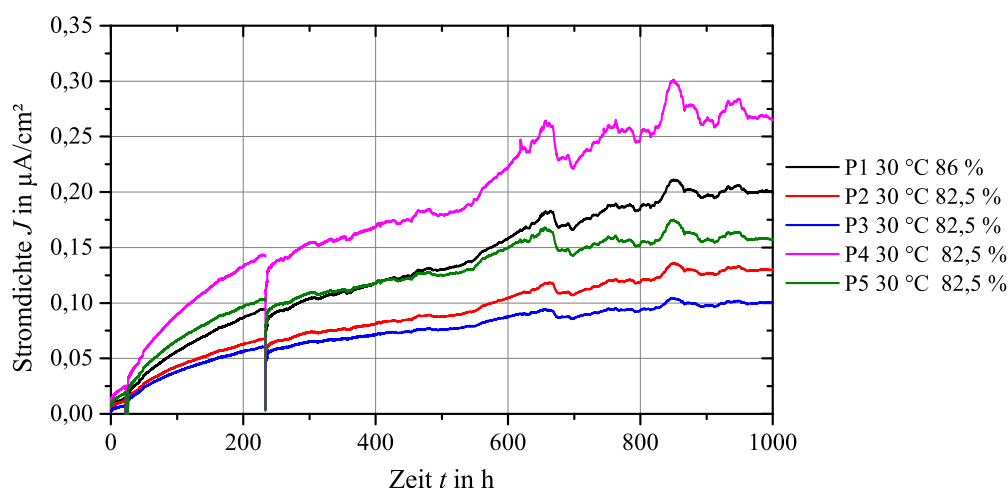


Abbildung 7.24: Stromdichten der Prüflinge P1 bis P5 (Charge C, alle bei  $30^\circ\text{C}$ ) über der gesamten Versuchsdauer [Sec 2012]

Bei  $60^\circ\text{C}$  (Abbildung 7.25) ist die Stromdichte gegenüber  $30^\circ\text{C}$  deutlich erhöht und steigt bei drei Prüflingen ebenfalls über die gesamte Versuchsdauer an. Hier kann bereits nach etwa 200-300 Stunden eine Annäherung an einen Endwert ( $3 - 5,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) festgestellt werden. Die Tendenzen der einzelnen Prüflinge sind unterschiedlich und korrelieren nicht mit den Füllgraden. Als Ursache wird eine unzureichende Kontaktierung der Prüflinge durch die Elektroden vermutet.

Die Prüflinge bei der höchsten Temperatur von  $100^\circ\text{C}$  (Abbildung 7.26) weisen zu Beginn der Prüfung den steilsten Anstieg in der Stromdichte auf<sup>13</sup>. Die Stromdichten nehmen jedoch nach etwa 50 Stunden wieder stark ab und stabilisieren sich nach etwa 400 Stunden Prüfdauer. Hierbei liegen die Stromdichten der Prüflinge bei  $100^\circ\text{C}$  unterhalb  $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , also entgegen der Erwartung unterhalb der Stromdichten der Prüflinge bei  $60^\circ\text{C}$ . Als Ursache wird auf eine irreversible Veränderung der

<sup>13</sup>Prüfling P14 (ganz links im Diagramm) weist einen extrem steilen Anstieg auf. Nach 22 Stunden Prüfdauer wurde der Versuch kurz unterbrochen und P14 entfernt. Die Unterbrechung ist als leichter Einbruch der Stromdichten der weiteren Prüflinge im Diagramm erkennbar. Vermutlich ist eine Fehlstelle oder eine Agglomeration von Partikeln im Volumen dieses Prüflings die Ursache.

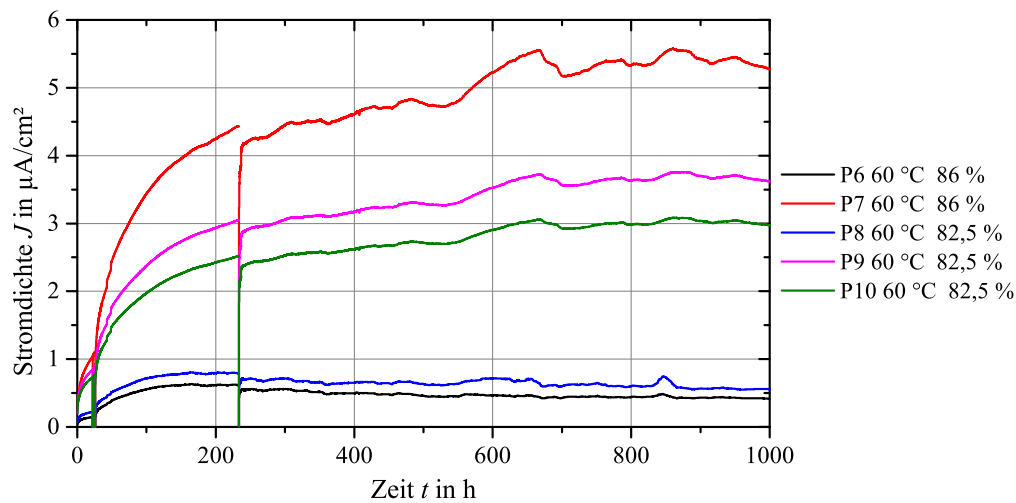


Abbildung 7.25: Stromdichten der Prüflinge P6 bis P10 (Charge C, alle bei 60 °C) über der gesamten Versuchsdauer [Sec 2012]

Kontaktierung der Prüflinge durch die Elektroden vermutet (vgl. Abbildung 7.28). Bezüglich der unterschiedlichen Mikrovaristor-Füllgrade der Prüflinge gibt es keinen klar erkennbaren Trend bzw. diese korrelieren nicht mit den gemessenen Stromdichten. Die Ergebnisse für 82,5 Prozent und 86 Prozent liegen generell nahe beieinander.

Bei sämtlichen Prüflingen wird eine irreversible Verschiebung der  $E$ - $J$ -Kennlinien um etwa eine Dekade in der Stromdichte infolge der Dauerbeanspruchung festgestellt (vgl. exemplarische Darstellung der Kennlinien von zwei Prüflingen, P4 und P7, vor und nach der Prüfdauer von 1000 h gemäß Abbildung 7.27). Offenbar hat neben dem kontinuierlichen Anstieg der Stromdichte auch eine Alterung des Werkstoffs stattgefunden. Das Ergebnis dieser 1000-h-Prüfung ist demzufolge nicht als optimal zu bewerten, und es sind Risiken im Langzeitverhalten erkennbar.

Nach Entnahme der Prüflinge aus dem Versuchsaufbau fallen vor allem bei den fünf Prüflingen P11-P15 (100 °C) im Bereich der aufgedruckten Messingelektroden farbliche Veränderungen auf (Abbildung 7.28 (a)) sowie pulverförmigen Auslösungen aus dem Werkstoff im Bereich der zuvor aufliegenden Elektroden (Abbildung 7.28 (b)). Es wird vermutet, dass diese Veränderungen als Ursache für das Absinken der Stromdichte bei den Prüflingen des 100 °C-Versuchs (nach dem anfänglich steilem Anstieg der Stromdichte zu Versuchsbeginn) in Betracht gezogen werden können. Möglicherweise hat durch die anfangs hohen Stromdichten eine irreversible Veränderung der

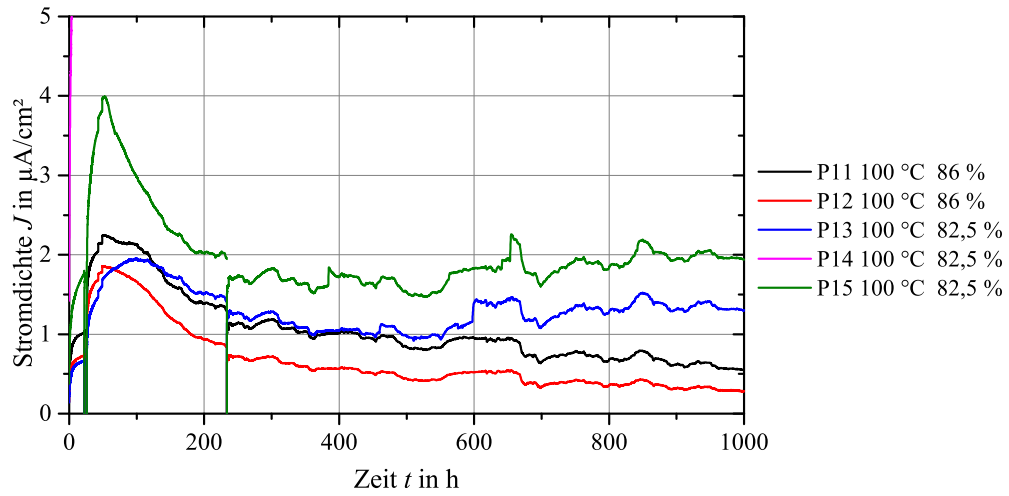


Abbildung 7.26: Stromdichten der Prüflinge P11 bis P15 (Charge C, alle bei 100 °C) über der gesamten Versuchsdauer [Sec 2012]

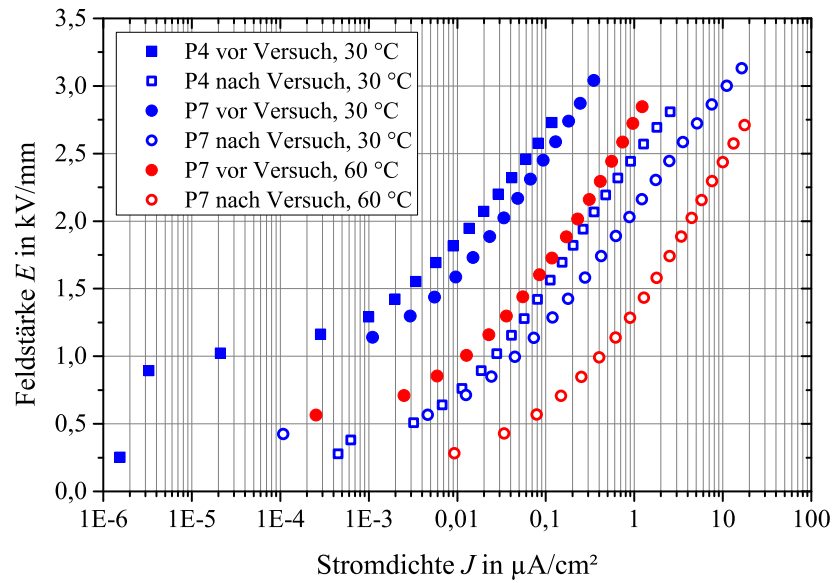


Abbildung 7.27: Kennlinien der Prüflinge P4 und P7, welche vor (gefüllte Symbole) und nach (ungefüllte Symbole) der Versuchsdauer von 1000 h gemessen wurden. P7 wurde jeweils im kalten und im erwärmten Zustand vermessen. [Sec 2012]

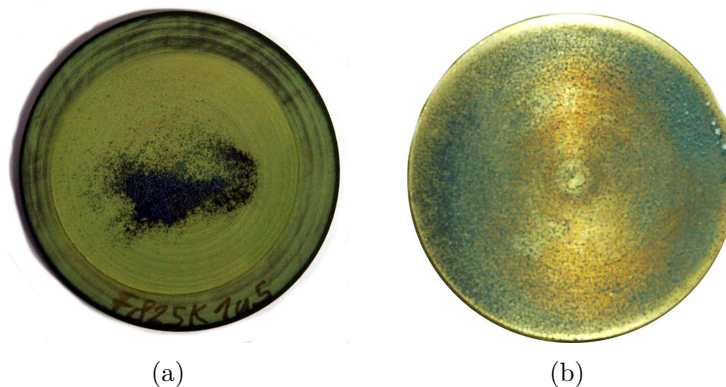


Abbildung 7.28: (a) Foto eines Prüflings nach Abschluss der 1000-Stunden-Langzeituntersuchung bei 100 °C, (b) Foto der Kontaktfläche der Messingelektrode nach 1000 Stunden bei 100 °C [Sec 2012]

Kontaktierung oder des Materials direkt an der Kontaktierung stattgefunden.

Die Kontaktierung über Messingelektroden ist demzufolge nach Abschluss des ersten Langzeitversuchs als problematisch einzustufen. Es stellt sich die Frage, ob diese Art der Kontaktierung auch als Ursache für die größtenteils instabilen, kontinuierlich zunehmenden Stromverläufe bei fast allen Prüflingen ausgemacht werden kann. Als Konsequenz werden sämtliche weiteren Untersuchungen mit Elektroden aus Silberleitlack durchgeführt, welcher direkt auf die zuvor gereinigten Oberflächen der Prüflinge aufgetragen wurde.

### Ergebnisse des Langzeitversuchs mit Polaritätswechsel

In einem weiteren Versuch wird die Kontaktierung durch eine Elektrodenanordnung gemäß Abbildung 6.1 (a) realisiert, d.h. die Prüflinge wurden direkt an ihrer Oberfläche mit Elektroden aus Silberleitlack kontaktiert. Als weitere Veränderung zum ersten Langzeitversuch werden Polaritätswechsel vorgenommen<sup>14</sup> sowie die elektrischen Feldstärken an den Prüflingen durch unterschiedliche Höhen der scheibenförmigen Segmente variiert. Bereits in den ersten Versuchs-Stunden zeigen alle fünf Prüflinge bei 100 °C einen extrem starken Anstieg der Stromdichte, welcher letztendlich zu elektrischen Durchschlägen und somit zum Ausfall dieser Prüflinge

---

<sup>14</sup>Mittlerweile liegt für HVDC-Überspannungsableiter auf ZnO-Basis eine Vorschrift für ein Prüfverfahren mit Polaritätswechseln nach 24 h, 72 h, 168 h und 360 h in der Norm [IEC 60099-9] vor.

führt. Die zehn verbleibenden Prüflinge bei den Temperaturen 30 °C und 60 °C zeigen ebenfalls einen kontinuierlichen Anstieg der Stromdichte. Die ansteigende Tendenz der Stromdichte wird jedoch nach jedem Polaritätswechsel zunächst revidiert. Im weiteren zeitlichen Verlauf steigt die Stromdichte erneut stetig an. Eine Auswahl von fünf Prüflingen, welche das typische Verhalten aller zehn Prüflinge widerspiegelt, ist in Abbildung 7.29 über die gesamte Prüfdauer dargestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass jeder Polaritätswechsel offenbar den zuvor festgestellten Anstieg der Stromdichte teilweise revidiert, und somit betragsmäßig geringere Stromdichten direkt nach einem Polaritätswechsel vorherrschen als davor. Insgesamt weist die Stromdichte der Prüflinge über die 1000 Stunden einen stabileren Verlauf auf als bei den Versuchen ohne Polaritätswechsel. Dieser Effekt ist auch für MO-Überspannungsableiter bekannt. Ihm ist in [IEC 60099-9] durch die Prüfprozedur für eine beschleunigte Alterungsprüfung unter Einfluss von Polaritätswechseln Rechnung getragen worden. Verantwortlich für diesen Effekt sind Polarisationsvorgänge, welche durch einen Polaritätswechsel rückgängig gemacht werden.

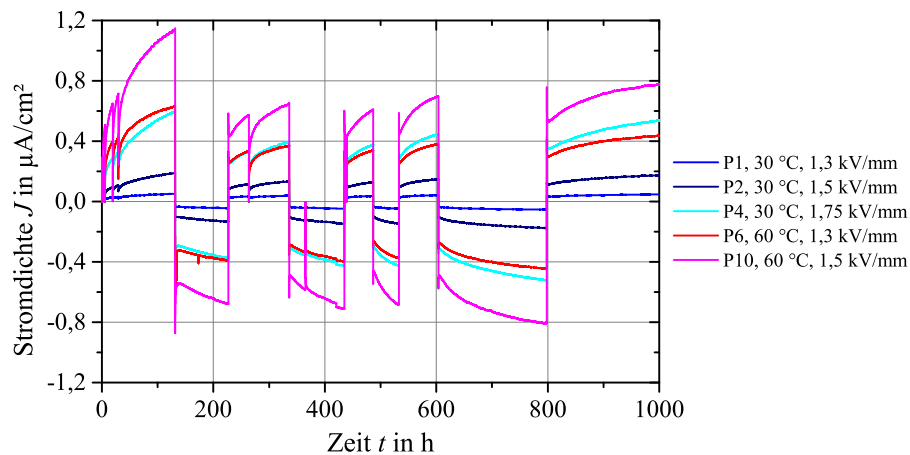


Abbildung 7.29: Darstellung von fünf typischen Stromdichteverläufen von Prüflingen bei 30 °C und 60 °C über die gesamte Prüfdauer von 1000 Stunden mit acht Polaritätswechseln, welche anhand des Verlaufs im Diagramm kenntlich gemacht werden [Sec 2012]

In Abbildung 7.30 sind exemplarisch für zwei ausgewählte Prüflinge bei den Temperaturen 30 °C und 60 °C die gemessenen  $E$ - $J$ -Kennlinien vor und nach Ablauf des zweiten Dauerversuchs über 1000 h dargestellt, bei positiver sowie negativer Polarität. Analog zum ersten Dauerversuch ist auch hier eindeutig eine Verschiebung der Kennlinie um etwa eine Dekade der Stromdichte feststellbar.

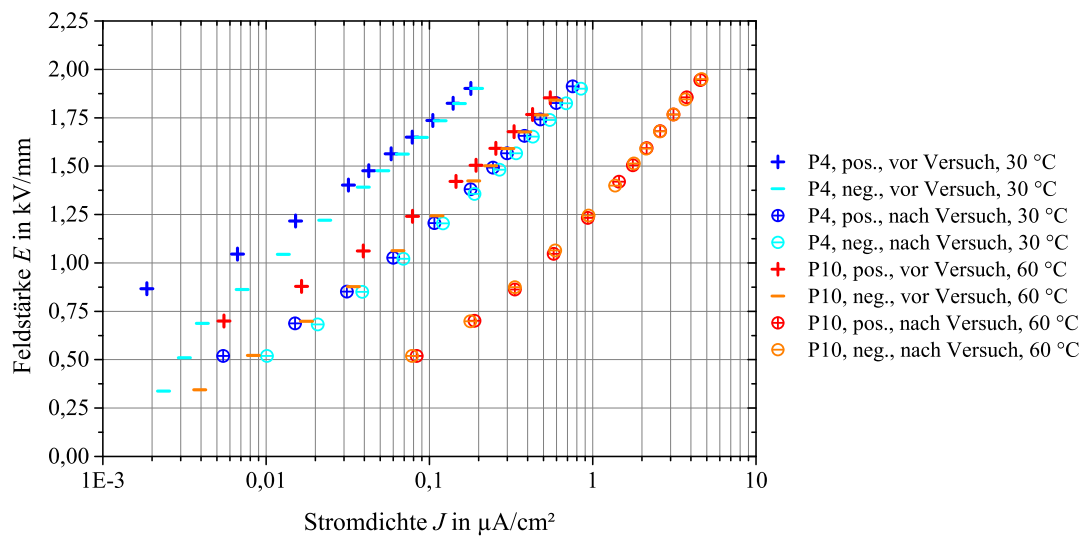


Abbildung 7.30: Kennlinien von zwei Prüflingen, P4 und P10, welche vor und nach Durchführung des Dauerversuchs bei positiver und negativer Polarität bei 30 °C (P4) bzw. 60 °C (P10) gemessen wurden [Sec 2012]

Als Ergebnis des zweiten Langzeitversuchs kann zunächst festgestellt werden, dass offenbar nicht die Art der Kontaktierung im ersten Langzeitversuch zu einem instabilen Verhalten der Stromdichte geführt hat, sondern die Instabilität auch bei Kontaktierung mittels Silberleitlack vorliegt. Eine Polaritätsumkehr führt zu einer kurzzeitigen Revision des vorhergegangenen Anstiegs der Stromdichte, welche im weiteren zeitlichen Verlauf allerdings wieder kontinuierlich ansteigt. Insgesamt fällt der Anstieg der Stromdichte geringer aus als beim vorangegangenen Versuch, somit ist die Auswirkung von Polaritätswechseln positiv zu betrachten. Da jedoch auch hier die Kennlinien der Prüflinge eine Verschiebung infolge des Versuchs erfahren und die Stromdichten eine zunächst steigende Tendenz zeigen und die elektrische Leitfähigkeit demzufolge ansteigt, ist auch das Ergebnis dieser Langzeitprüfung ebenfalls als negativ zu bewerten. Die untersuchten Prüflinge verhalten sich instabil und sind deshalb nicht geeignet.

### Langzeitverhalten verschiedener mikrovaristorgefüllter Polymere

Als Konsequenz aus dem negativen Ausgang der beiden Langzeituntersuchungen an Prüflingen aus Epoxidharz, gefüllt mit Mikrovaristoren der Charge *C*, werden zur Klärung der Ursache über einen kürzeren Zeitraum Messungen an weiteren Prüfkörpern durchgeführt. Dazu werden die Mikrovaristoren der Charge *A* (vgl. Abbildung 7.33) durch einen Forschungspartner in HTV-Silikon eingemischt, außerdem wird ein Epoxidharzverguss mit sphärischen Mikrovaristoren (vgl. Abbildung 7.32) mit einer deutlich geringeren Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  erstellt. Weiterhin wird ein HTV-Silikon, ebenfalls gefüllt mit sphärischen Mikrovaristoren, zu Vergleichszwecken vermessen.

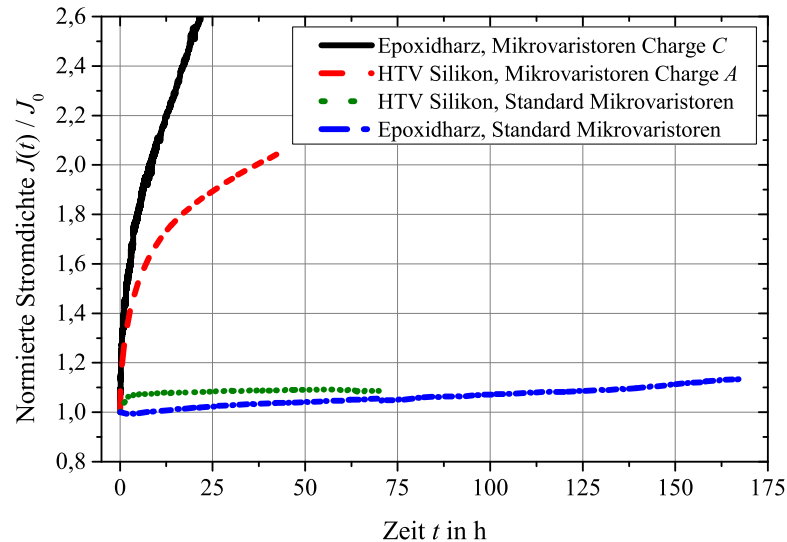


Abbildung 7.31: Vergleich der auf den Startwert normierten, zeitlichen Stromdichteverläufe  $J(t)/J_0$  von sphärischen Mikrovaristoren und Mikrovaristoren der Charge *A*, jeweils in Epoxidharz und HTV-Silikon als Trägermatrix [Ten 2013a]. Die Messungen wurden jeweils mit einer Feldbeanspruchung  $E = 0,5 \cdot E_b$  bei  $\vartheta = 30^\circ\text{C}$  durchgeführt.

Der zeitliche Verlauf der durch die Prüflinge gemessenen Stromdichte wird bei einer Temperatur von  $30^\circ\text{C}$  aufgezeichnet. Die elektrische Prüf-Feldstärke wird aufgrund der stark unterschiedlichen  $E$ - $J$ -Charakteristiken der Prüfkörper zu jeweils etwa der halben Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  des jeweiligen gefüllten Werkstoffs gewählt, um eine vergleichbare Beanspruchung zu erzielen. Anhand der Ergebnisse in Abbildung 7.31

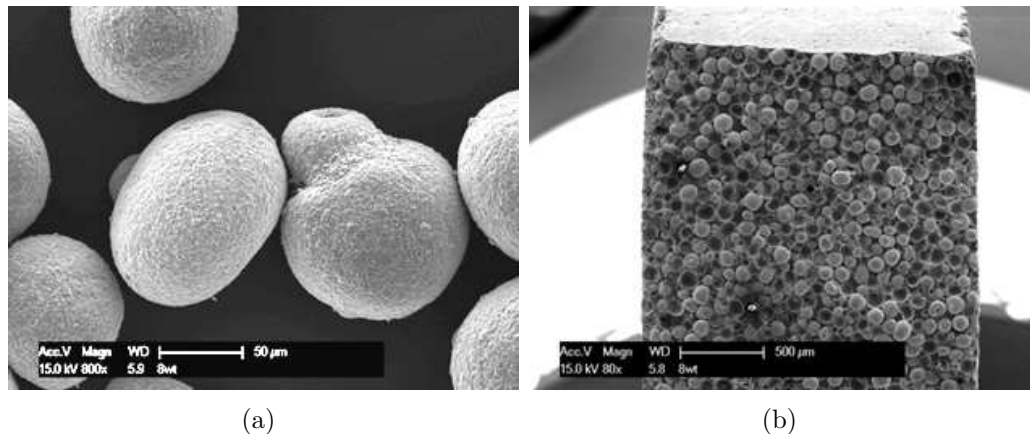


Abbildung 7.32: REM-Aufnahmen: (a) Übliche Mikrovaristoren für geringe Schaltfeldstärken, überwiegend sphärische Partikel; (b) Bruchkante des in Abbildung 7.31 untersuchten EP Prüflings mit sphärischen Mikrovaristoren

ist erkennbar, dass offenbar die Struktur der Mikrovaristoren maßgeblich über ein stabiles oder instabiles Verhalten der Stromdichte bei Gleichspannungsbeanspruchung entscheidet. Der Einfluss der Polymermatrix spielt hingegen allenfalls eine untergeordnete Rolle. Als Ergebnis wird festgestellt, dass das Vorliegen von Bruchstücken bzw. das mechanische Zermahlen von sphärischen Mikrovaristoren in einem instabilen Langzeit-Verhalten bei Gleichspannung resultiert.

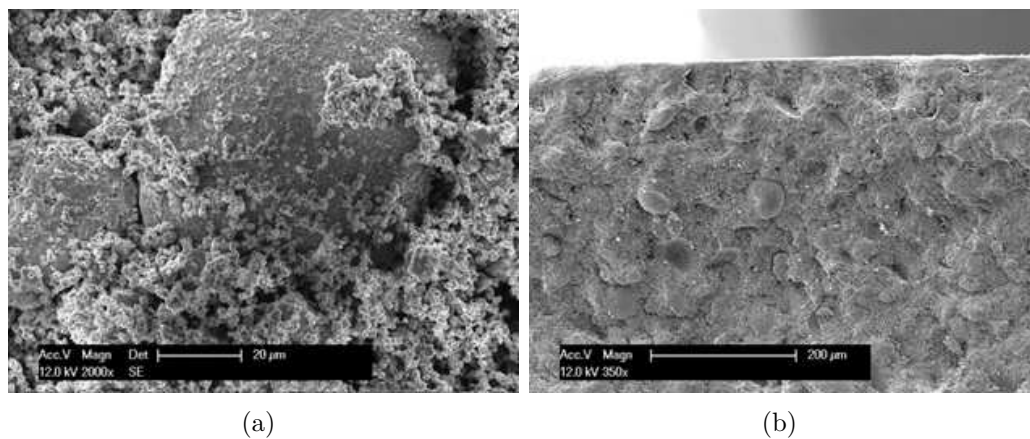


Abbildung 7.33: REM-Aufnahmen: (a) Mikrovaristoren der Charge *C* mit vielen Bruchstücken und wenigen sphärischen Partikeln; (b) Bruchkante des in Abbildung 7.31 untersuchten EP Prüflings mit Charge *C* Mikrovaristoren

Die REM-Aufnahmen des mit Standard-Mikrovaristoren gefüllten Epoxidharzes (Abbildung 7.32 (b)) im Vergleich zur Aufnahme des mit Charge *C* gefüllten Epoxidharzes



(Abbildung 7.33 (b)) zeigen auch optisch deutlich den Unterschied zwischen diesen beiden Prüflingen der Messung aus Abbildung 7.31.

### 7.1.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die untersuchten Prüflinge aus Epoxidharz, gefüllt mit Prototyp-Mikrovaristoren mit modifizierter Rezeptur, zeigen die generelle Realisierbarkeit von polymeren Werkstoffen mit typischer, nichtlinearer  $E$ - $J$ -Kennlinie, aber wesentlich erhöhten Schaltpunktfeldstärken  $E_b$  in der Größenordnung 3 kV/mm bis etwa 7 kV/mm. Sämtliche hergestellten Prüflinge aus mikrovaristorgefülltem Epoxidharz zeigen jedoch eine hohe Temperaturabhängigkeit der nichtlinearen  $E$ - $J$ -Kennlinie, welche sich in Form einer signifikanten irreversiblen Verschiebung der Kennlinie zu höheren Stromdichten bei steigender Temperatur auswirkt.

Anhand von Hochspannungsmessungen an zylindrischen Prüflingen unter  $\text{SF}_6$ -Atmosphäre werden die Messergebnisse der Materialproben (scheibenförmige Segmente aus den zylindrischen Prüflingen) bestätigt. Weiterhin wird in Stoßspannungsversuchen nachgewiesen, dass die zylindrischen Prüfkörper stets in Form eines elektrischen Durchschlags versagen, nach Erreichen von Feldstärken oberhalb  $1,5 \cdot E_b$ . Dies führt ausnahmslos zum Aufreißen der Prüfkörper und somit zu einer irreversiblen Zerstörung. Als Konsequenz dürfen derart gefüllte Werkstoffe nur mit einem hohen Sicherheitsabstand zur Schaltpunktfeldstärke der Mikrovaristoren (vgl. Abschnitt 2.5.2) betrieben und geprüft werden.

In Langzeituntersuchungen wird über eine Prüfdauer von 1000 Stunden nachgewiesen, dass bei Gleichspannungsbeanspruchung eine stetige Zunahme der Stromdichte  $J$  durch das Volumen der mikrovaristorgefüllten Werkstoffproben stattfindet. Dies gilt allerdings lediglich für zermahlene Mikrovaristoren für hohe Schaltpunktfeldstärken. Messungen an HTV-Silikon-Prüflingen mit einem hohen Anteil sphärischer Partikel und einem sehr geringen Anteil an Bruchstücken hingegen zeigen bei Dauerbeanspruchung ein stabiles Verhalten der gemessenen Stromdichte  $J$  durch das Volumen. Die gleichen Partikel eingemischt in Epoxidharz zeigen ein näherungsweise stabiles Verhalten. Demzufolge sind eine Weiterentwicklung durch Werkstoffexperten sowie eine Modifikation der Herstellungsparameter erforderlich, aber auch aussichtsreich, um Mikrovaristoren als Füllstoffe für hohe Feldstärken bei Gleichspannungsbeanspruchung zu ertüchtigen.

## 7.2 Charakterisierung von ATO-gefüllten Polymeren

Als weiterer, möglicher funktioneller Füllstoff in Gießharzen werden die in Abschnitt 2.5.3 vorgestellten, planaren Glimmerpartikel mit nanoskaliger Zinnoxid-Beschichtung charakterisiert. Aufgrund der benötigten geringen Leitfähigkeit werden ausschließlich Partikel mit der geringsten derzeit lieferbaren elektrischen Leitfähigkeit des Typs *Minatec*<sup>®</sup> *SCM E12* [Mer 2011] verwendet. Es hat sich herausgestellt, dass eine Einmischung nach der Epoxidharz-Rezeptur, welche bereits für Mikrovaristoren zur Prüfkörper-Herstellung erfolgreich verwendet wurde, auch im Falle der *Minatec*<sup>®</sup>-Partikel sehr gut realisierbar ist. Aufgrund der deutlich geringeren Dichte von etwa 3,3 g/cm<sup>3</sup> bis 3,5 g/cm<sup>3</sup> [Mer 2011] ergibt sich allerdings für die Rezeptur ein deutlich geringerer Partikelanteil in Gewichtsprozent<sup>15</sup> (vgl. Abschnitt 6.1.1).

### 7.2.1 Kennlinie

Unter Verwendung der in Abschnitt 6.1.1 aufgeführten Epoxidharz-Rezeptur werden zylindrische Prüflinge mit einem Füllstoffanteil von 38,7 % *Minatec*<sup>®</sup> *SCM E12* hergestellt. Aufgrund einer bereits sehr hohen Viskosität der Vergussmasse bei diesem Füllstoffanteil ist eine weitere Erhöhung des Füllstoffanteils nicht möglich. Analog zu den Messungen an mikrovaristorgefüllten Epoxidharz-Prüflingen werden scheibenförmige Segmente von den zylindrischen Stäben abgestochen, diese gemäß Abschnitt 6.2 mit Silberleitlack präpariert, getrocknet und unter Verwendung der Elektrodenanordnung gemäß Abbildung 6.1 (a) die elektrische *E-J*-Kennlinie ermittelt. Bei den Messungen ist zunächst besonders auffällig, dass der Strom durch das Volumen des Prüflings sich nicht sofort nach Erreichen einer Spannungsstufe stabilisiert, sondern jeweils eine stark abfallende Tendenz aufweist. Offenbar handelt es sich hierbei um Polarisierungseffekte, welche auch bei konventionellen Isolierwerkstoffen mit niedriger elektrischer Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$  auftreten. Derartige Effekte konnten bei mikrovaristorgefüllten Polymeren nicht festgestellt werden, allerdings weisen die Messungen am ATO-gefüllten Werkstoff Ströme in der Größenordnung von nur Nanoampère auf, womit der Effekt wie für konventionelle Isolierwerkstoffe erklärt werden kann.

---

<sup>15</sup>Füllstoffgehalte werden auch in diesem Abschnitt in % angegeben und bezeichnen grundsätzlich Gewichtsanteile.

Aufgrund der Polarisierungseffekte ist eine Charakterisierung deutlich erschwert. Abbildung 7.34 verdeutlicht dies anhand des mehrfach wiederholten Messablaufs eines Scheibensegments im zeitlichen Verlauf.

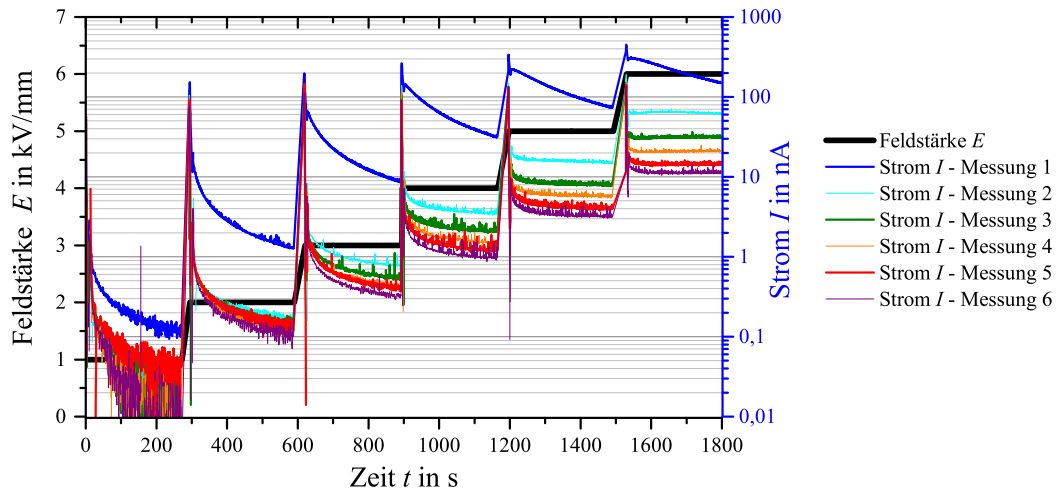


Abbildung 7.34: Darstellung von sechs wiederholten, zeitlichen Abfolgen der Strommessung durch das Volumen eines *Minatec*<sup>®</sup> *SCME12*-gefüllten Prüflings (Höhe  $h = 2$  mm) bei sechs diskreten Spannungsstufen. Die Messungen erfolgten bei 30 °C.

Abbildung 7.35 zeigt die aus der sechsten Messung ermittelte  $E$ - $J$ -Kennlinie. Die Messpunkte stellen hierbei den jeweils zum Ende einer Spannungsstufe gemessenen Strom  $I$  dar, umgerechnet auf Stromdichte. Im Vergleich zu mikrovaristorgefülltem Epoxidharz werden nicht nur deutlich geringere Ströme durch den Prüfkörper gemessen, sondern diese treten auch bei deutlich höheren elektrischen Feldstärken auf, wie diese Messungen mit Feldstärken von bis zu 6 kV/mm zeigen. Somit stellt die hier dargestellte  $E$ - $J$ -Kennlinie des Volumens der hergestellten Prüfkörper durchaus eine realistische Dimensionierung für DC-GIS-Isolatoren dar. Ausgehend von Betriebsfeldstärken in DC-GIS von etwa 3 kV/mm beinhaltet diese Werkstoffkennlinie bereits eine Sicherheitsmarge für auftretende Überspannungen, da auch bei der doppelten Betriebsfeldstärke noch sehr geringe Stromdichten vorliegen. Eine feldstärkeabhängige Nichtlinearität ist auch beim ATO-gefüllten Prüfling klar anhand der  $E$ - $J$ -Kennlinie erkennbar.

Neben den Messungen der Ströme durch das Volumen des zylindrischen Prüflings werden auch Messungen an der Oberfläche durchgeführt. Hierfür werden zunächst

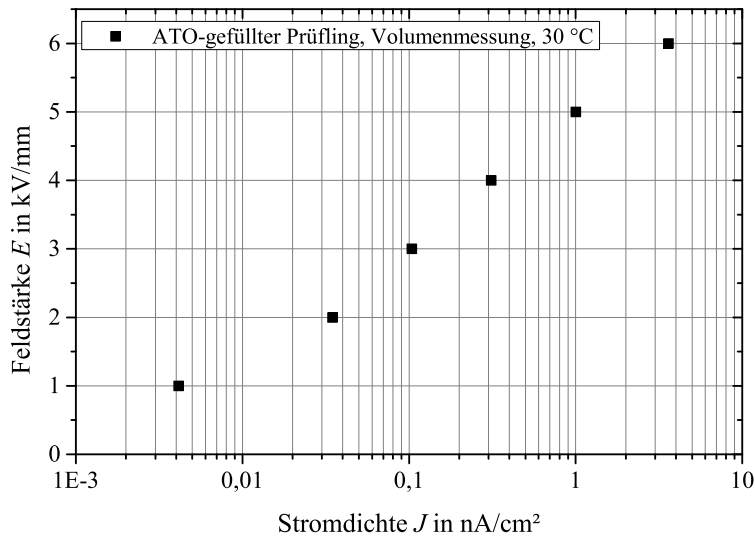


Abbildung 7.35: Halblogarithmische Darstellung der  $E$ - $J$ -Kennlinie der sechsten Messung des *Minatec*<sup>®</sup> *SCME12*-gefüllten Prüflings bei 30 °C. Die Messpunkte sind jeweils nach dem Abklingen der Polarisation am zeitlichen Ende einer Spannungsstufe aus Abbildung 7.34 entnommen.

Elektroden aus Silberleitlack aufgetragen und anschließend Elektroden aus Aluminium angebracht (vgl. Abschnitt 6.2.1). Der Abstand zwischen Erdelektrode und Hochspannungselektrode beträgt 12 mm, der Durchmesser des Prüflings beträgt 45 mm. Wie bereits ausgeführt, kann das stromdurchflossene Volumen nicht quantifiziert werden, da die Eindringtiefe des Stroms unbekannt ist. Aufgrund der Nichtlinearität des Werkstoffs ist allerdings davon auszugehen, dass lediglich eine sehr oberflächennahe Volumenschicht maßgeblich zum Stromfluss beiträgt. Abbildung 7.36 zeigt drei aufeinanderfolgende Messungen in ihrem zeitlichen Ablauf. Obwohl bei dieser Messung eine deutlich geringere bezogene Spannung  $U/h^{16}$  von maximal 1 kV/mm realisiert werden konnte (aufgrund der Abmessungen der Anordnung zu den Oberflächenmessungen) und das zum Stromfluss beitragende Volumen der oberflächennahen Schicht deutlich kleiner als bei den zuvor gezeigten Volumenstrommessungen anzunehmen ist, werden Werte des Stroms  $I$  im Bereich 100 nA bereits bei 1 kV/mm gemessen. Ähnliche Werte (rund 100 nA) werden bei der Volumenmessung erst bei Feldstärken von 6 kV/mm erreicht, bei deutlich größerem am Stromfluss beteiligtem Volumen.

<sup>16</sup> $h$  stellt hierbei den Abstand zwischen Erdelektrode und Hochspannungselektrode in der Messanordnung gemäß Abschnitt 6.2.1 dar.

Offensichtlich weist der oberflächennahe Bereich des gefüllten Epoxidharzes eine wesentlich höhere Leitfähigkeit im Vergleich zum Volumen auf. Ein weiteres Indiz hierfür, ebenfalls anhand des Diagramms in Abbildung 7.36 klar erkennbar, ist die im Vergleich zu den Volumenmessungen rascher abklingende Polarisierung. Bereits nach der dritten Wiederholung der Messung ist der gemessene Strom im zeitlichen Verlauf einer Spannungsstufe über 5 Minuten jeweils nahezu konstant.

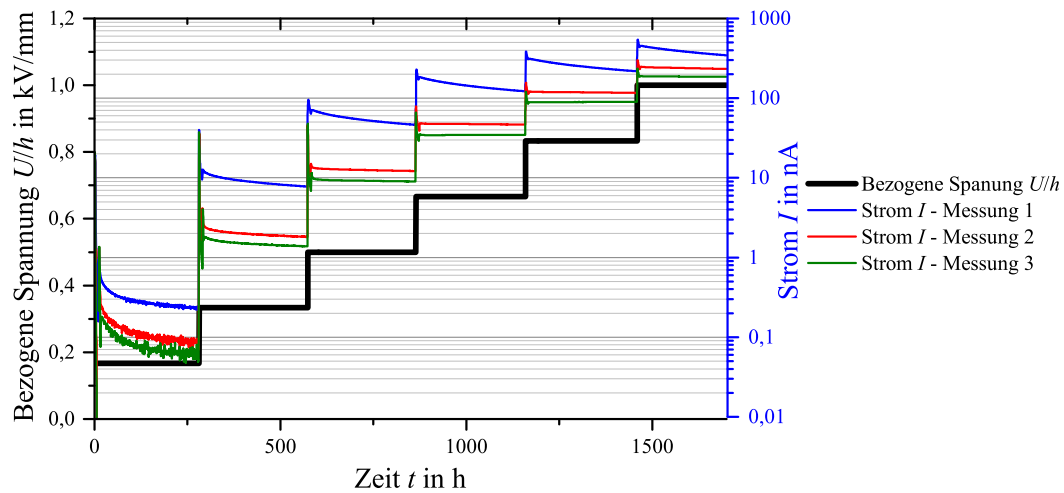


Abbildung 7.36: Darstellung von drei wiederholten, zeitlichen Abfolgen der Strommessung entlang der oberflächennahen Schicht eines *Minatec*<sup>®</sup> *SCME12*-gefüllten Prüflings (Höhe  $h = 2$  mm) bei sechs diskreten Spannungsstufen. Die Messungen erfolgten bei 30 °C.

Anhand der Ergebnisse der dritten Wiederholung der Messung bei 30 °C wird für die Oberflächenmessung die  $U/h$ - $I$ -Kennlinie ausgewertet (vgl. Abbildung 7.37). Allerdings kann, wie bereits erwähnt, lediglich der über der bezogenen Spannung  $U/h$  aufgetragene, gemessene Strom  $I$  dargestellt werden, da eine Umrechnung zur Stromdichte  $J$  nicht möglich ist. Auch in dieser Kennlinie ist eine feldstärkeabhängige Nichtlinearität deutlich erkennbar.

Es wird vermutet, dass die planare Geometrie der verwendeten ATO-Partikel eine entscheidende Rolle für die Diskrepanz zwischen der Oberflächen- und Volumenstrommessung spielt. Während der flüssigen Phase, direkt nach dem Eingießen der Gießharzmasse in die zylindrische Vergussform, können sich die planaren ATO-Partikel mit ihrer Oberfläche parallel zur Wandung der Gussform ausrichten. Im Kernvolumen hingegen ist die Ausrichtung willkürlich. Hierdurch ergeben sich folglich

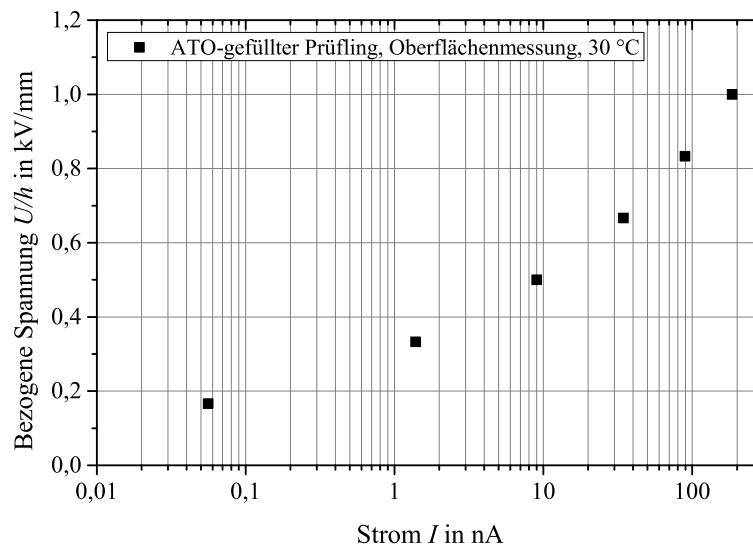


Abbildung 7.37: Darstellung der  $U/h$ - $I$ -Kennlinie der sechsten Messung des *Minatec*<sup>®</sup> *SCME12*-gefüllten Prüflings in halblogarithmischer Achsenskalierung bei 30 °C. Die Messpunkte wurden jeweils nach dem Abklingen der Polarisation am zeitlichen Ende einer Spannungsstufe aus Abbildung 7.36 entnommen.

im Perkulationsnetzwerk des oberflächennahen Volumens kürzere Perkulationspfade mit einer entsprechend geringeren Anzahl an Potentialbarrieren als im Kernvolumen. Anhand von REM-Aufnahmen<sup>17</sup> einer Bruchkante des hergestellten Prüflings kann diese Vermutung bestätigt werden. In Abbildung 7.38 (a) ist klar eine unterschiedliche Struktur im oberflächennahen Volumen erkennbar. Die Aufnahme zeigt eine Ausrichtung der Partikel parallel zur Oberfläche in einer etwa 200  $\mu\text{m}$  starken Schicht. Auch im aufgenommenen Schrägbruch der Abbildung 7.38 (b) sind die verschiedenen, planaren Schichten gut erkennbar.

Für eine weitere messtechnische Überprüfung werden zylindrische Prüflinge mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung vermessen. Ein Prüfling wird gar nicht bearbeitet<sup>18</sup>, der zweite Prüfling wird an seiner Oberfläche mit Schleifwolle angeschliffen. Die Messung des Stroms an der Oberfläche der beiden Prüflinge führt zu vergleichbaren Ergebnissen. Aus diesem Grund wird nach der ersten Messung von

---

<sup>17</sup>Mit freundlicher Unterstützung von Herrn Raschid Baraki, Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe, Technische Universität Darmstadt.

<sup>18</sup>Es wird lediglich die Oberfläche des Prüflings mit Isopropanol gereinigt.

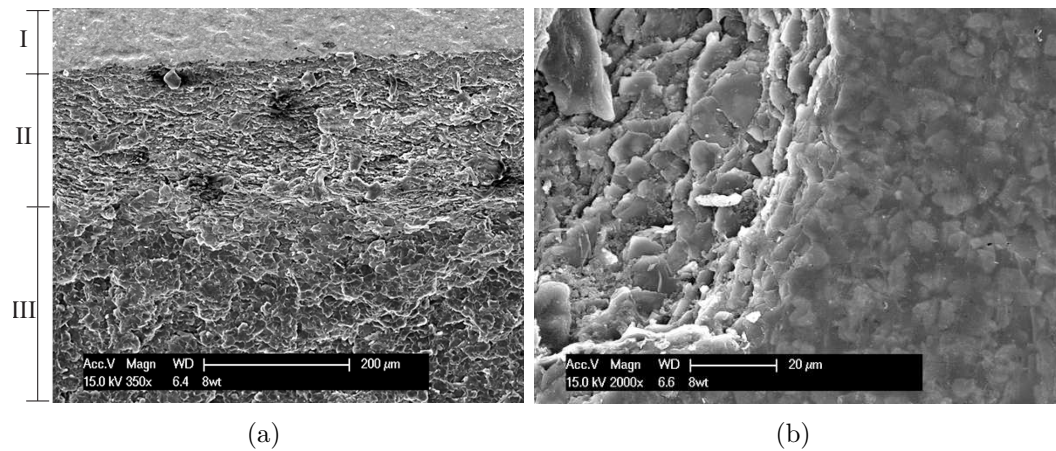


Abbildung 7.38: REM-Aufnahmen: (a) Frontale Aufnahme einer Bruchkante des ATO-gefüllten Prüflings: Oben im Bild (Bereich I) befindet sich die Oberfläche des Prüflings. Deutlich erkennbar ist eine unterschiedliche Ausrichtung der planaren Partikel im oberflächennahen Bereich II und im tiefer liegendem Volumen (Bereich III); (b) Blick von oben auf eine abgeschrägte Bruchkante, auch hier ist die Ausrichtung der Partikel überwiegend parallel zur Oberfläche gut erkennbar.

einem Zylinder in einer Drehbank 1 mm der Mantelfläche abgedreht. Anschließend wird die abgedrehte Oberfläche mit Isopropanol gereinigt, erneut mittels Silberleitlack Elektroden aufgetragen und die Messung nochmals wiederholt. Nach dieser Bearbeitung wird eine deutliche Reduzierung der gemessenen Ströme an der Oberfläche festgestellt (vgl. Abbildung 7.39).

Diese Messergebnisse bestätigen die Überlegungen zur Ausrichtung der Partikel und decken sich mit den REM-Aufnahmen aus Abbildung 7.38. In den REM-Aufnahmen weisen etwa bis zu einer Tiefe von 200 µm der oberflächennahen Volumenschicht ausgerichtete Partikel auf, diese Schicht wurde offensichtlich vor der dritten Messung (rote Kennlinie der Abbildung 7.39) entfernt, so dass an der Oberfläche keine planare Partikelstruktur mehr vorliegt. Die Anzahl der Potentialbarrieren durch die zufällige Verteilung der Partikel ist vergrößert, demzufolge werden deutlich geringere Ströme gemessen.

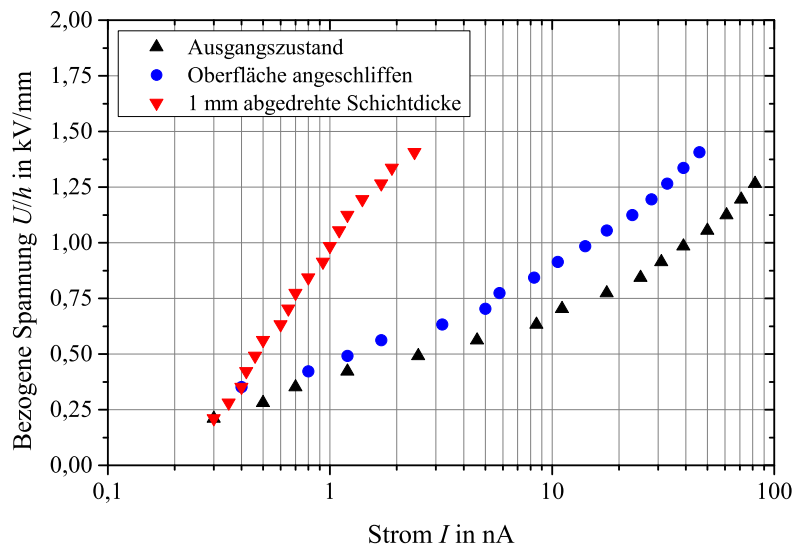


Abbildung 7.39: Vergleich der Messergebnisse nach unterschiedlicher Bearbeitung der Oberfläche eines Prüflings. Schwarz dargestellt die Messung der unbearbeiteten Oberfläche, blau nach Anschleifen des Prüflings und rot nach Abdrehen einer Schichtdicke von etwa 1 mm von der Mantelfläche.

## 7.2.2 Temperaturabhängigkeit der Kennlinie

Zur Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der Kennlinie ATO-gefüllter Prüflinge wird der Versuchsstand gemäß Abschnitt 5.1.1 verwendet. Wegen der bereits geschilderten Polarisierungseffekte wird bei jeder Temperaturstufe die Aufzeichnung der Kennlinie jeweils erst nach fünf Durchläufen ausgewertet. Es werden jeweils bei 30 °C, 60 °C und 100 °C die Ströme durch das Volumen des Prüflings gemessen und hieraus entsprechende  $E$ - $J$ -Kennlinien errechnet (vgl. Abbildung 7.40). Aus diesen Ergebnissen wird die temperaturabhängige Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$  bestimmt (Abbildung 7.41). Es zeigt sich eine verhältnismäßig geringe Abhängigkeit der Kennlinie von der Temperatur, welche zwischen 30 °C und 100 °C um etwa eine Dekade variiert. Ebenfalls aus dem Diagramm ableitbar ist die moderate Abhängigkeit der Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$  von der elektrischen Feldstärke, welche zwischen 1 kV/mm und 6 kV/mm um weniger als eine Dekade zunimmt.

Messungen der Temperaturabhängigkeit an der Oberfläche zeigen erneut deutliche Abweichungen zu den zur Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$  gewonnenen Ergebnissen, jedoch



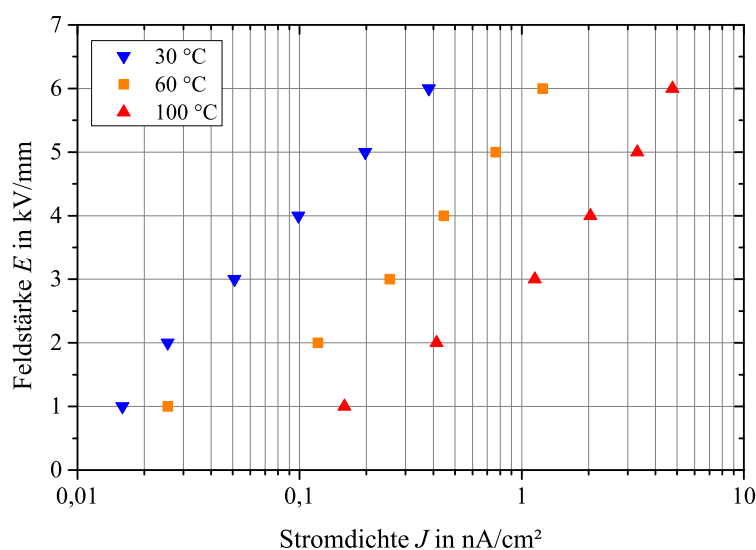


Abbildung 7.40: Temperaturabhängige  $E$ - $J$ -Kennlinien des *Minatec*® *SCM E12*-gefüllten Prüflings, Messung des Stroms durch das Volumen. Es wurden die jeweils die Werte der fünften aufeinanderfolgenden Messung am Ende der jeweils angelegten Spannungsstufe ausgewertet.

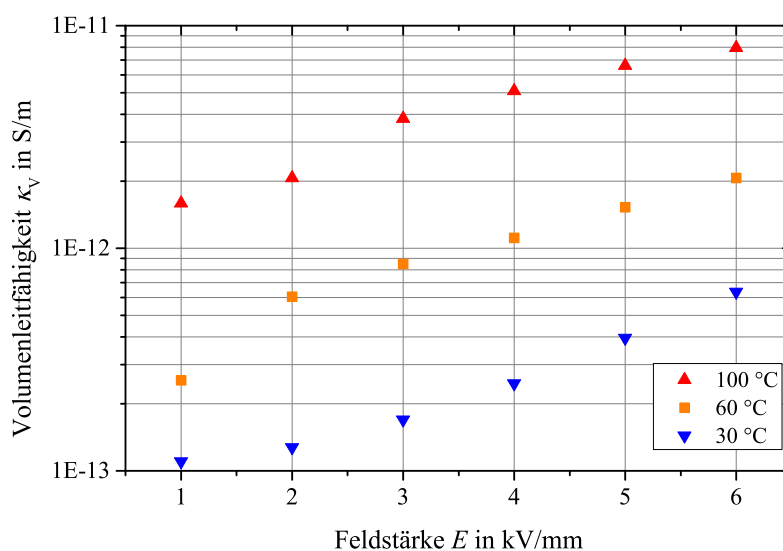


Abbildung 7.41: Temperaturabhängige  $\kappa_V$ - $E$ -Kennlinien des *Minatec*® *SCM E12*-gefüllten Prüflings, Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$ , ermittelt aus den Messpunkten der Abbildung 7.40.

ist auch an der Oberfläche eine relativ geringe Temperaturabhängigkeit feststellbar. Auch bei diesen Versuchen gestaltet sich die Messungen aufgrund von Polarisierungseffekten schwierig, insbesondere bei 30 °C werden erst nach vielfachen, langen Messreihen dauerhaft stabile Stromwerte erzielt. Die in Abschnitt 7.2.1 gezeigten Ergebnisse sind zwar im zeitlichen Verlauf innerhalb von 5 Minuten relativ konstant, aber die Stromwerte fallen bei Langzeitbelastung sehr langsam, jedoch stetig auf deutlich geringere Stromwerte ab. Bei den Versuchen steigt der gemessene Strom bei einem Temperaturanstieg von 30 °C auf 60 °C um etwa eine Dekade an, bei Messungen von 60 °C auf 100 °C sogar um weniger als eine Dekade (Abbildung 7.42). Zum Vergleich zwischen Oberflächen- und Volumenstrommessung ist im Diagramm außerdem ein Messpunkt der Volumenstrommessung aus Abbildung 7.42 eingetragen. Der im Volumen gemessene Strom bei 100 °C liegt sogar unterhalb des bei 30 °C an der Oberfläche gemessenen Wertes. Anhand der Differenz von mehr als zwei Dekaden der gemessenen Ströme bei 100 °C an Oberfläche und Volumen<sup>19</sup> wird nochmals die sehr hohe Differenz zwischen der Leitfähigkeit des Kernvolumens und des oberflächennahen Volumens der vermessenen Prüflinge deutlich.

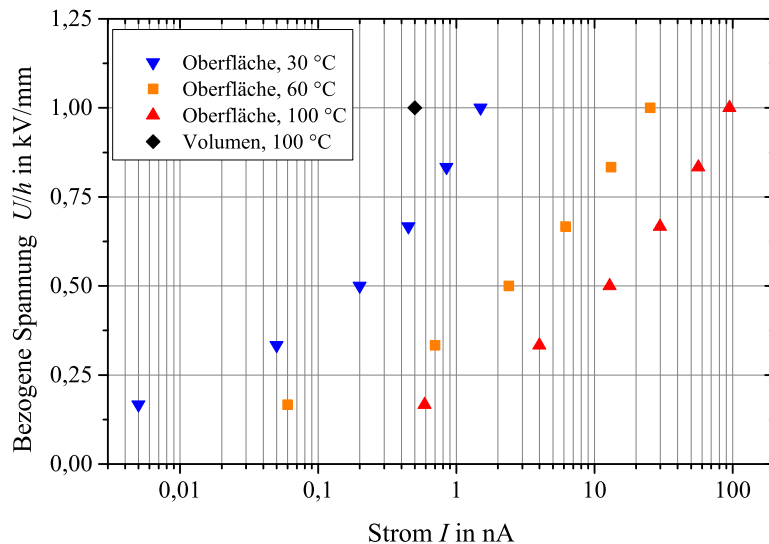


Abbildung 7.42: Temperaturabhängige  $I$ - $U/h$ -Kennlinien, gemessen an der Oberfläche des *Minattec*® *SCME12*-gefüllten Prüflings, sowie vergleichend hierzu ein Messpunkt bei 100 °C und 1 kV/mm der Volumenmessung (Abbildung 7.41).

<sup>19</sup>Im Vergleich der Ströme  $I$  ist außerdem das stromführende Volumen der beiden Messungen nicht berücksichtigt, welches bei der Volumenstrommessung deutlich größer angenommen wird.

Insgesamt wird an der Oberfläche bei vergleichsweise geringer Feldbeanspruchung von 1 kV/mm schon ein vergleichsweise hoher Strom von 100 nA bei einer Temperatur von 100 °C gemessen. Unter der Annahme, dass die hochleitfähige, maßgeblich zum Stromfluss beitragende oberflächennahe Schicht des Prüflings eine Dicke von 1 mm besitzt<sup>20</sup>, ergibt sich eine Querschnittsfläche von lediglich 1,38 cm<sup>2</sup>, so dass die als Strom  $I$  angegebenen Achsenskalierung des Diagramms der Abbildung 7.42 näherungsweise auch als Stromdichte  $J$  in nA/cm<sup>2</sup> betrachtet werden kann. Geht man den REM-Aufnahmen der Abbildung 7.38 zufolge von lediglich 200 µm Schichtdicke aus, ergibt sich eine kleinere Querschnittsfläche von nur 0,28 cm<sup>2</sup>. Für die Berechnung der Stromdichte  $J$  in nA/cm<sup>2</sup> müssen die gemessenen Ströme in nA mit dem Faktor 3,5 multipliziert werden.

In einer zweiten Messreihe wird in der Anordnung zur Oberflächenmessung der Abstand zwischen Erdelektrode und Hochspannungselektrode auf 6 mm halbiert, um im Versuchsstand höhere Feldstärken zu ermöglichen. Als weitere Modifikation wird jede angelegte Spannungsstufe für eine deutlich längere Zeitdauer von 1 Stunde gehalten. Die Strommessung erfolgt jeweils zum Ende einer Spannungsstufe.

In der Abbildung 7.43 ist zunächst festzustellen, dass in der zweiten Messreihe niedrigere Werte des Stroms gemessen werden. Demzufolge war die Polarisierung im Falle der ersten Messreihe (Abbildung 7.42) offenbar noch nicht vollständig abgeschlossen. Feldstärken oberhalb von 1,7 kV/mm können aufgrund von Überschlügen in Luft zwischen den aufgesetzten Aluminium-Ringelektroden im verwendeten Aufbau mit Temperaturschrank nicht realisiert werden. Für die Ermittlung der Kennlinie bei höheren Feldstärken müssen entsprechende Messungen in einem gasdichten, evakuierbaren Temperaturschrank unter SF<sub>6</sub>-Atmosphäre wiederholt werden. Außerdem muss die Zeitdauer je Spannungsstufe so groß wie möglich gewählt werden, um die stationäre Leitfähigkeit ohne Polarisierungseffekte zu erfassen.

Der Nichtlinearitätsexponent  $\alpha$  der ermittelten Kennlinien ist im Falle der Volumensmessung in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke  $E$  (Abbildung 7.44) bzw. im Falle der Oberflächenmessung in Abhängigkeit der höhenbezogenen Spannung  $U/h$  (Abbildung 7.45) berechnet worden.

Die Werte der Nichtlinearität liegen im Volumen etwas niedriger, und es ist zudem bei

---

<sup>20</sup>Die Versuche in Abbildung 7.39 zeigten, dass ein mechanisches Abdrehen von 1 mm der Mantelfläche die an der Oberfläche gemessenen Ströme maßgeblich reduziert.

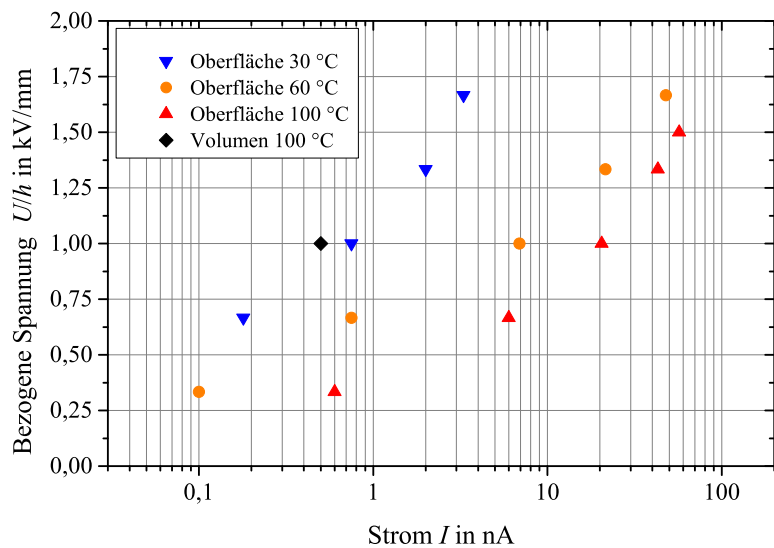


Abbildung 7.43: Zweite Messung der temperaturabhängigen  $I$ - $U/h$ -Kennlinien an der Oberfläche des *Minattec*<sup>®</sup> *SCM E12*-gefüllten Prüflings. Die Kennlinienpunkte sind nach 1 Stunde anliegender Spannungshöhe gemessen.

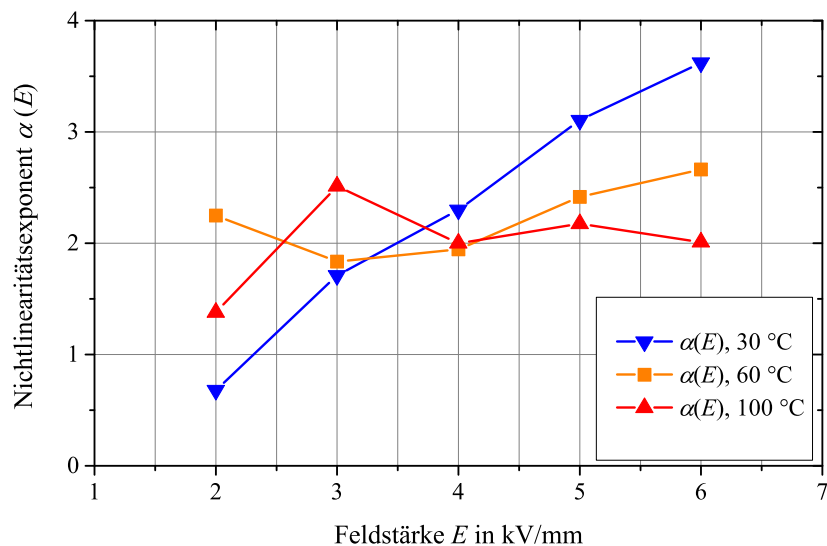


Abbildung 7.44: Nichtlinearitätsexponenten der Kennlinien des Kernvolumens in Abhängigkeit der Temperatur und der Feldstärke. Ausgewertet sind die Kennlinien der Volumenmessung (Abbildung 7.40).

30 °C eine Zunahme von  $\alpha$  mit der Feldstärke feststellbar. Bei der Oberflächenmessung liegen insgesamt etwas höhere Werte vor, im Bereich zwischen 3 und 3,5, und diese sind über der höhenbezogenen Spannung relativ konstant. Dieses Ergebnis spricht dafür, dass im Volumen weniger perkolierende Pfade existieren oder aufgrund der größeren Anzahl von Potentialbarrieren diese noch nicht vollständig überwunden werden. Die ermittelten Nichtlinearitätsexponenten der Oberflächenmessung stimmen gut mit der Angabe  $\alpha = 3$  in der Literatur überein (vgl. [Lan 2013] bzw. Abschnitt 2.5.3).

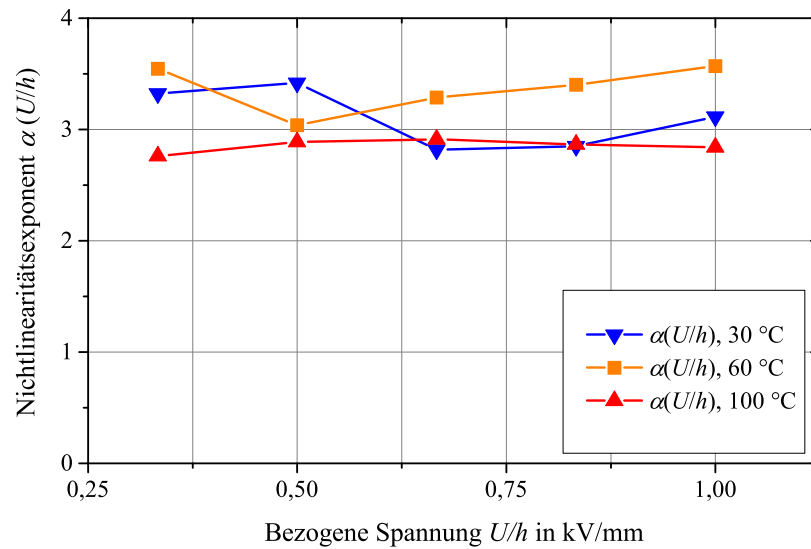


Abbildung 7.45: Nichtlinearitätsexponenten der Kennlinien des oberflächennahen Volumens in Abhängigkeit der Temperatur und der höhenbezogenen Spannung. Ausgewertet sind die Kennlinien der Messung des oberflächennahen Volumens (Abbildung 7.42).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die vergleichsweise hohe Leitfähigkeit im Bereich der Oberfläche für eine Beanspruchung des Werkstoffs mit sehr hohen Feldstärken, im Falle eines DC-GIS-Isolators etwa 3 kV/mm im Normalbetrieb, noch etwas reduziert werden muss. Der Hersteller des Füllstoffs hat in Aussicht gestellt, Partikel mit einer um zwei Dekaden reduzierten Leitfähigkeit anfertigen zu können. Hierdurch könnte ein Isolierstoff realisiert werden, welcher aufgrund der Struktur der Füllstoffpartikel eine vergleichsweise hohe Leitfähigkeit im Bereich der Oberfläche bietet, bei gleichzeitig niedriger Leitfähigkeit im Volumen, und ohne die mechanischen Nachteile von zusätzlich aufgetragenen Beschichtungen (z.B. Lacke) aufzuweisen.

Andererseits kann durch Abtragen der Mantelschicht des Gießharzkörpers die Schicht mit der höheren Leitfähigkeit gezielt entfernt werden, und es resultiert dann ein Polymer mit willkürlich verteilten und willkürlich orientierten Partikeln, welches insgesamt eine sehr niedrige Leitfähigkeit besitzt.

### 7.2.3 Hochspannungsversuche

#### Versuche mit Gleichspannungsbeanspruchung

Für Versuche im gasisolierten Hochspannungs-Versuchsaufbau nach Abschnitt 5.2 werden die erstellten Epoxidharzprüflinge in Form von zylindrischen Prüfkörpern (Durchmesser  $d = 45$  mm, Höhe  $h = 130$  mm) gemäß Abschnitt 6.2.2 mit Elektroden präpariert. Die Versuche werden unter reinem  $\text{SF}_6$  bei einem Druck von 0,4 MPa (abs.) durchgeführt. Zwei Prüflinge, Prüfling A und Prüfling B, werden mit einer stufenweise erhöhten Prüfspannung von bis zu  $U = 300$  kV beaufschlagt, dies entspricht einer Prüffeldstärke  $E = 2,3$  kV/mm. Die Spannungsstufen betragen  $\Delta U = 20$  kV, jede Spannungsstufe wird für 300 s gehalten, und der Strom  $I$  durch den Prüfling wird kontinuierlich aufgezeichnet. Der gemessene Strom  $I$  durch den Prüfkörper stellt hierbei den Gesamtstrom dar, also Volumenstrom und Oberflächenstrom. Das Messergebnis (Abbildung 7.46) zeigt, dass nach jeder Erhöhung der Feldstärke bis  $E = 1,23$  kV/mm (entspricht der Prüfspannung  $U = 160$  kV) der Strom  $I$  zunächst kurz ansteigt, dann aber wieder stark abfällt und somit die bereits an den Werkstoffproben beobachteten Polarisationseffekte zeigt. Bei höheren Feldstärken hingegen wird nach einem leichten Anstieg im Strom  $I$  jeweils ein nahezu konstanter Wert des Stroms gemessen, mit nur sehr gering abfallender Tendenz. Auffällig ist der Wert des gemessenen Stroms, welcher ab etwa 1,4 kV/mm einen Wert von 1  $\mu\text{A}$  überschreitet und im weiteren Verlauf auch zweistellige  $\mu\text{A}$ -Werte annimmt.

Es ist davon auszugehen, dass bei niedriger Spannungsbeanspruchung der Prüflinge aufgrund der geringen elektrischen Leitfähigkeit des nichtlinear leitfähigen Werkstoffs Polarisationsströme die Messung dominieren. Dies erklärt auch das Abklingen des gemessenen Stroms im zeitlichen Verlauf bei Feldbeanspruchung mit  $E < 1$  kV/mm. Bei höherer Prüfspannung lässt sich vermuten, dass die Potentialbarrieren überwunden werden und die gemessenen, deutlich höheren Ströme überwiegend Leitungsströme darstellen, welche ein stabileres Verhalten im zeitlichen Verlauf haben. Ein Einfluss

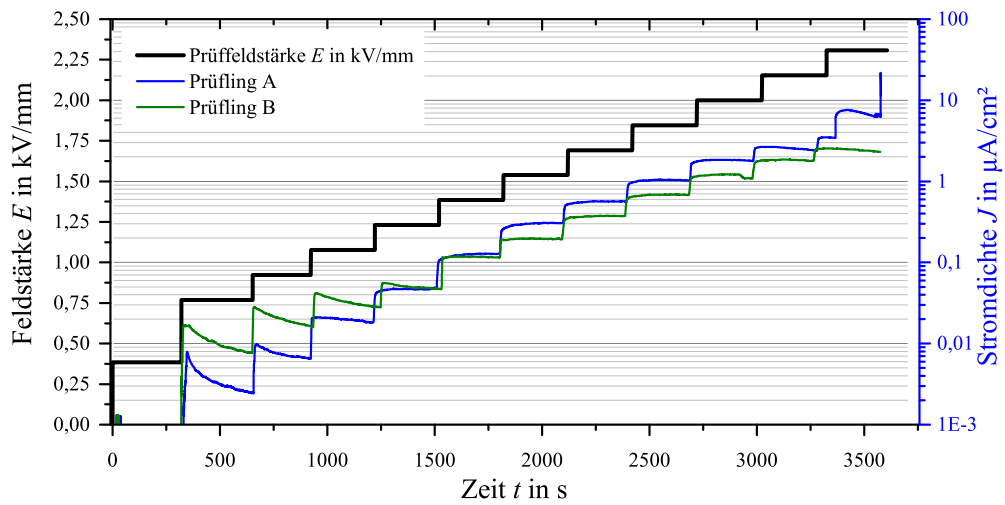


Abbildung 7.46: Ergebnis der Hochspannungs-Gleichspannungsversuche an zwei Minatec® SCME12-gefüllten Prüflingen. Die Prüffeldstärke  $E$  (schwarz) wurde schrittweise gesteigert und die Stromdichte  $J$  (Gesamtstromdichte, d.h. Volumen und Oberfläche) kontinuierlich aufgezeichnet (blau, grün).

infolge der Vorbeanspruchung durch die vorhergehenden Spannungsstufen wird als vernachlässigbar erachtet, da in vorhergegangenen Messungen über deutlich längere Zeiträume Polarisierungseffekte festgestellt werden konnten. Im Falle von Prüfling B ist auffällig, dass dieser ab einer Prüffeldstärke von etwa 1,5 kV/mm im Vergleich zu Prüfling A höhere gemessene Ströme aufweist. Bei der höchsten Feldstärke, 2,3 kV/mm, ist zudem ein Sprung zu höheren Werten nach etwa einer Minute festzustellen. Außerdem erfolgt nach etwa 4 Minuten ein elektrischer Durchschlag. Offenbar ist die maximale Stromtragfähigkeit der leitfähigen Pfade überschritten.

Aufgrund der gemessenen Stromwerte im  $\mu\text{A}$ -Bereich wird davon ausgegangen, dass der Hauptteil des Stroms im oberflächennahen Volumen der Prüflinge fließt. Dies ist auch daraus ersichtlich, dass die gemessenen Stromwerte in den Hochspannungsversuchen bei 140 kV, was einer elektrischen Feldstärke von etwa 1 kV/mm entspricht, in der Größenordnung von 100 nA liegen und somit gut mit den gemessenen Strömen der Oberflächenmessung bei 1 kV/mm übereinstimmen. Anhand des Modells in Abbildung 7.47 sollen die verschiedenen Messungen und die gewonnenen Ergebnisse nochmals verdeutlicht werden. Abbildung 7.47(a) und (b) stellen die Messung der Volumenleitfähigkeit (a) und der Oberflächenleitfähigkeit (b) dar, welche in Abschnitt 7.2.1 gezeigt wurden.

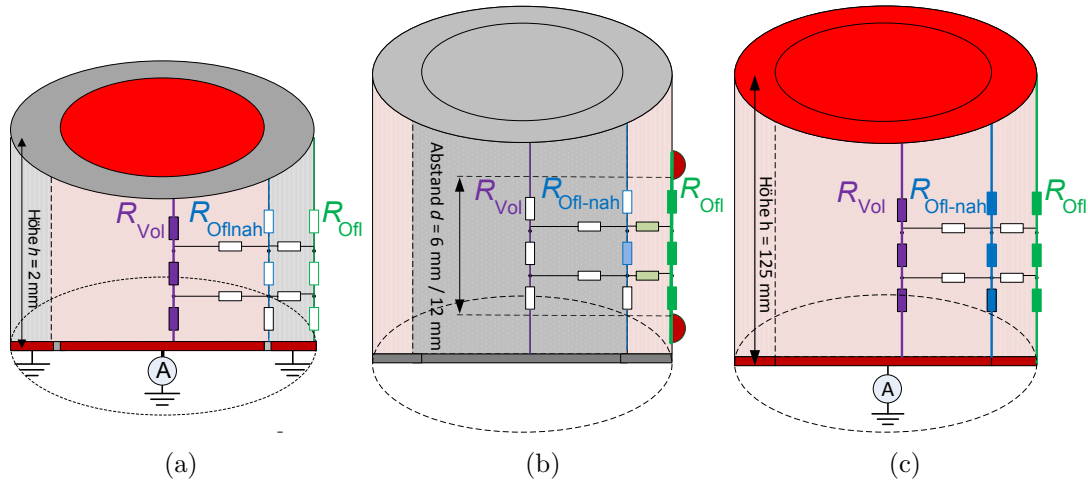


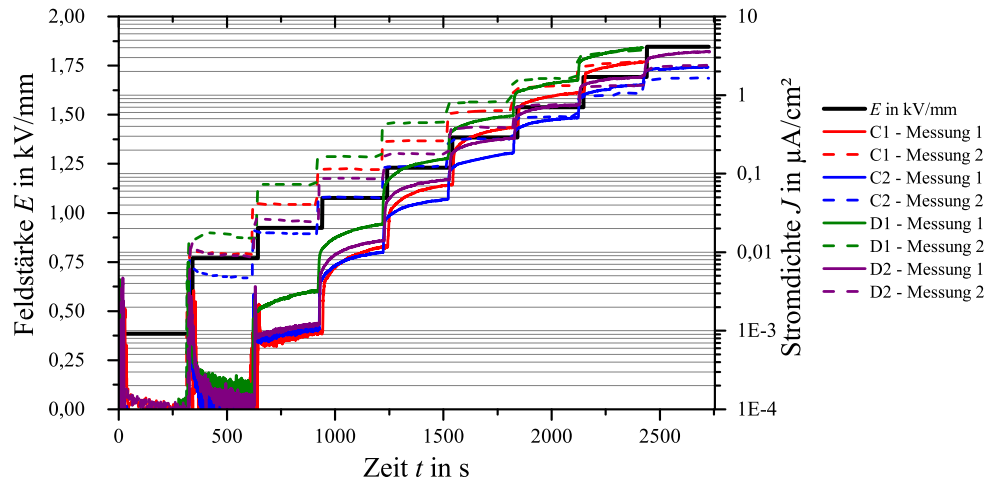
Abbildung 7.47: Modell zur Erklärung der verschiedenen durchgeführten Messungen, aktive Widerstände sind jeweils farbig gefüllt eingezeichnet: (a) Messung der Volumenleitfähigkeit mit geschützter Elektrode; (b) Messung der Oberflächenleitfähigkeit; (c) Messungen im Hochspannungsversuch mit vollflächig kontaktierten Stirnflächen, ohne geschützte Elektrode. Modell nach [Ten 2013c] und [Win 2014].

Das Modell verdeutlicht, dass bei der Volumenleitfähigkeit ausschließlich die Widerstände  $R_{\text{Vol}}$  den Strom tragen. Diese Widerstände werden aufgrund der willkürlich verteilten, planaren Partikel mit sehr langen Ketten und sehr vielen Potentialbarrieren als besonders hoch angenommen. Aufgrund der geschützten Elektrode werden durch das Messgerät keine Ströme über die Oberfläche erfasst. Bei der Oberflächenmessung tragen insbesondere die Widerstände  $R_{\text{Ofl}}$  den Strom, diese werden aufgrund der parallel zur Oberfläche ausgerichteten Füllstoffpartikel mit kurzen Ketten und entsprechend weniger Potentialbarrieren im Vergleich zu  $R_{\text{Vol}}$  deutlich geringer angenommen:  $R_{\text{Ofl}} \ll R_{\text{Vol}}$ . Im Falle der abgedrehten Oberfläche greifen im Modell die oberflächennahen Widerstände  $R_{\text{Ofl-nah}}$ , es wird  $R_{\text{Ofl-nah}} > R_{\text{Ofl}}$  angesetzt. Aufgrund der Anisotropie des gefüllten Werkstoffs spielen Widerstände in radialer Richtung nur eine untergeordnete Rolle.

Zu einem späteren Zeitpunkt werden an Prüflingen aus zwei weiteren Vergüssen (mit E12-Partikeln aus derselben Charge), Prüflinge C1, C2 und D1, D2, weitere Messungen im Hochspannungsversuchsaufbau durchgeführt (Abbildung 7.48). Im direkten Vergleich zu Abbildung 7.46 kann festgestellt werden, dass die dort gemessenen Stromdichten bei allen vier Prüflingen etwas höher liegen. Um eine Zerstörung



zu vermeiden, wird bei einer Stromdichte von mehreren  $\mu\text{A}$  die Messung jeweils abgebrochen.



Abbildungung 7.48: Ergebnis zu den Hochspannungs-Gleichspannungsversuchen an vier Minatec<sup>®</sup> SCME12-gefüllten Prüflingen. Die Prüffeldstärke  $E$  (schwarz) wurde schrittweise gesteigert und die Stromdichte  $J$  (Gesamtstromdichte, d.h. Volumen und Oberfläche) kontinuierlich aufgezeichnet und logarithmisch im Diagramm über der Zeit  $t$  aufgetragen.

Ursächlich für die höheren Ströme ist möglicherweise eine stärkere parallele Ausrichtung der Partikel im Bereich der Oberfläche. Zwei dieser Prüflinge werden im Anschluss an die Messung um 1 mm am Umfang mechanisch abgedreht (vgl. Abbildung 7.49). Anschließend wird die Messung wiederholt.

Überraschenderweise zeigt sich bei den beiden abgedrehten Prüflingen keine Reduzierung der Stromdichte. Es muss also entweder auch im Volumen eine parallele Ausrichtung der Partikel stattgefunden haben, oder das Abdrehen einer 1 mm starken Schicht war nicht ausreichend. Weitere Untersuchungen mit einer höheren Anzahl an Prüflingen und einem Abdrehen in unterschiedlichen Schichtdicken sind zur Klärung dieses Ergebnisses notwendig.

Auch bei den Minatec<sup>®</sup> SCME12-gefüllten Hochspannungs-Prüflingen kann bei Erreichen der letzten beiden angelegten Prüffeldstärken anhand von Infrarot-Thermografien eine Erwärmung nachgewiesen werden. Diese ist jedoch bei allen gemessenen Prüflingen über der gesamten Oberfläche gleichmäßig verteilt, anders als bei den mikrovaristorgefüllten Prüflingen (vgl. Abbildung 7.18).

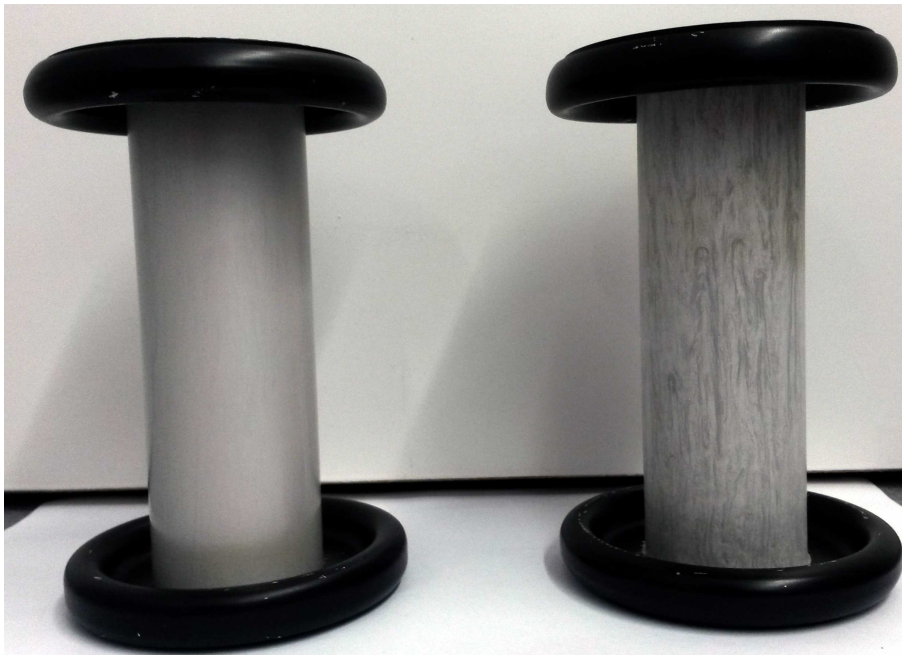


Abbildung 7.49: Foto der Hochspannungsprüflinge; links mit unbehandelter Oberfläche, rechts mit abgedrehter Oberfläche.

### Versuche mit Stoßspannungsbeanspruchung

Analog zu den Messungen an mikrovaristorgefüllten Zylindern werden zwei zylindrische Prüflinge mit zu den Gleichspannungsversuchen identischer Geometrie mit Schaltstoßspannungsimpulsen ( $250/2500 \mu\text{s}$ ) bei positiver Polarität beaufschlagt. Die Messergebnisse werden im Folgenden erläutert.

Prüfling 1: Insgesamt werden 165 Stöße angelegt, jeweils zehn pro Spannungsstufe. Die letzte Spannungsstufe  $\hat{u}_{\text{SI}} = 734 \text{ kV}$  wird zehn Mal gehalten und der Versuch an Prüfling 1 ohne Durch- oder Überschlag beendet. Nach dem Versagen von Prüfling 2 wird Prüfling 1 erneut geprüft. Hierbei wird ein Einbruch der Spannung beim ersten Stoß der Höhe  $\hat{u}_{\text{SI}} = 631 \text{ kV}$  verzeichnet, ebenso bei den darauffolgenden Beanspruchungen. An Prüfling 1 kann jedoch kein äußerlicher Schaden festgestellt werden, d.h. vermutlich fand keine Entladung am Prüfling, sondern an einer anderen Stelle innerhalb des Prüfaufbaus statt.

Prüfling 2: Insgesamt werden 181 Stöße angelegt.  $\hat{u}_{\text{SI}} = 791 \text{ kV}$  wird 4 Mal bestanden, der 5. Stoß mit dieser Spannungshöhe führt zu einem Spannungseinbruch. Optisch kann auch an Prüfling 2 kein äußerlicher Schaden festgestellt werden.

Die vier Prüflinge C1, C2-abgedreht und D1, sowie D2-abgedreht werden im Anschluss an die Messungen mit Gleichspannung ebenfalls mit positiven Schaltstoßspannungsimpulsen (250/2500  $\mu$ s) beaufschlagt. Tabelle 7.4 stellt das Ergebnis dieser Messungen dar.

Tabelle 7.4: Versagenspegel der Schaltstoßspannungsprüfung von Prüfling C1 und C2-abgestochen sowie D1 und D2-abgestochen

Prüfling	Versagenspegel $\hat{u}_{\text{Vers}}$
C1	642 kV
C2-abgestochen	662 kV
D1	669 kV
D2-abgestochen	678 kV

Bei allen vier Prüflingen erfolgt der Zusammenbruch bei der Versagensspannung in der Stirn des Schaltstoßimpulses. Nach Erreichen des Versagenspegels werden die Prüflinge erneut mit Stößen, um etwa 10 bis 20 kV reduziert, beaufschlagt. Diese werden mehrfach gehalten. Bei Steigerung der Spannung bis in den Bereich des vorherigen Versagenspegels erfolgt erneut ein Zusammenbruch in der Stirn des Schaltstoßimpulses. Nach Abschluss der Prüfung können keine Spuren von Entladungen oder Beschädigungen an den Prüflingen festgestellt werden, so dass nicht abschließend geklärt werden kann, ob bei der Versagensspannung tatsächlich ein Ausfall des Prüflings erfolgt oder ein Überschlag stattgefunden hat.

Als Gesamtergebnis dieser Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die Versagensspannung aller untersuchten Prüflinge bei mindestens 650 kV liegt, also etwa 150 kV über der Versagensspannung der untersuchten mikrovaristorgefüllten Prüflinge (vgl. Tabelle 7.2 und Tabelle 7.3). Bei Multiplikation dieses Ergebnisses mit dem Skalierungsfaktor 2,5 (analog zu Abschnitt 7.1.4) ergibt sich rechnerisch eine Versagensspannung von 1625 kV. Da bei den *Minatec*<sup>®</sup> *SCM E12*-gefüllten Hochspannungs-Prüflingen keine Zerstörung infolge der Stoßspannungsbeanspruchungen festgestellt werden konnte, kann möglicherweise ein geringerer Sicherheitsabstand der Versagensspannung zur geforderten Prüfspannung angesetzt werden. Dieses Ergebnis erscheint demzufolge für die Forderung eines Blitzstoßspannungs-Prüfpegels von 1425 kV realistisch.

### 7.2.4 Langzeitverhalten bei Gleichspannungsbeanspruchung

Der im Abschnitt 5.1.2 vorgestellte Versuchsstand für Langzeituntersuchungen wird für die Untersuchungen des Langzeitverhaltens ATO-gefüllter Prüflinge verwendet. Aufgrund der zu messenden Ströme im nA-Bereich ist die Strommessung ausschließlich unter Verwendung eines Picoampèremeters möglich. Um mit einem einzigen Picoampèremeter die Ströme aller 15 Prüflinge zu erfassen, wird eine Multiplexerschaltung verwendet. Diese schaltet in festen Zeitabständen über jeweils zwei Relais die niederspannungsseitige Elektrode auf direktes Erdpotential bzw. auf den Messeingang des Picoampèremeters um. Somit erfolgt an jedem Prüfling eine kontinuierliche Erfassung des Stroms über eine gewählte Zeitspanne. An den ATO-gefüllten Epoxidharz-Prüflingen werden zwei Langzeitversuche durchgeführt. Im ersten Versuch werden ausschließlich scheibenförmige Segmente der zylindrischen Prüfkörper verwendet, an welchen der Strom durch das Volumen erfasst wird. Die Kontaktierung erfolgt mittels Elektroden, welche aus Silberleitlack direkt auf den Oberflächen aufgetragen wurden, mit geschützter Elektrode gemäß Abschnitt 6.2.1, Abbildung 6.1 (a). Im zweiten Versuch werden neben den scheibenförmigen Segmenten auch zylindrische Prüflinge mit Elektrodenkonfiguration zur Messung des Stroms entlang der Oberfläche und innerhalb des oberflächennahen Volumens verwendet (siehe Abschnitt 6.2.1).

#### Ergebnisse des ersten Langzeitversuchs

Für den ersten Langzeitversuch an ATO-gefüllten Prüflingen wird die Prüfspannung zu 5 kV gewählt. Aufgrund der unterschiedlichen Höhen der verwendeten, scheibenförmigen Prüfkörper resultiert eine Beanspruchung mit einer elektrischen Feldstärke zwischen 1,25 kV/mm und 2,5 kV/mm. Tabelle 7.5 listet die 15 verwendeten Prüfkörper mit der entsprechenden elektrischen Prüf-Feldstärke und Prüf-Temperatur detailliert auf.

Tabelle 7.5: Liste der Prüflinge des ersten Langzeit-Alterungsversuchs. Bei sämtlichen Prüflingen handelt es sich um scheibenförmige Segmente der Höhe  $h$

Höhe $h$	Resultierende Feldstärke $E$	Bezeichnung des Prüflings und zugehörige Prüftemperatur
2 mm	2,5 kV/mm	2, 3, 4, 5 (30 °C) & 6, 7, 9 (60 °C)
3 mm	1,67 kV/mm	1 (30 °C) & 8, 10 (60 °C) & 11 (100 °C)
4 mm	1,25 kV/mm	12, 13, 14, 15 (100 °C)

Die Ergebnisse für die fünf Prüflinge bei 30 °C (Abbildung 7.50) zeigen deutlich, dass die gemessene Stromdichte nach Anlegen der Prüfspannung zunächst stark abfällt, um sich dann innerhalb einer Toleranz auf eine relativ konstante Stromdichte zu stabilisieren. Die geringste Stromdichte wird bei Prüfling 1 gemessen. Dies entspricht der Erwartung, da hier auch bei der geringsten Temperatur (30 °C) mit einer geringeren Feldstärke beansprucht wird (vgl. Tabelle 7.5). Nach den Polaritätswechseln, welche nach 400 Stunden, 800 Stunden und 900 Stunden durchgeführt werden, zeigt sich jeweils ein Verhalten analog zum Einschaltvorgang, also ein zunächst rasches Abklingen der Stromdichte mit anschließend konstanter bis leicht abfallender Stromdichte.

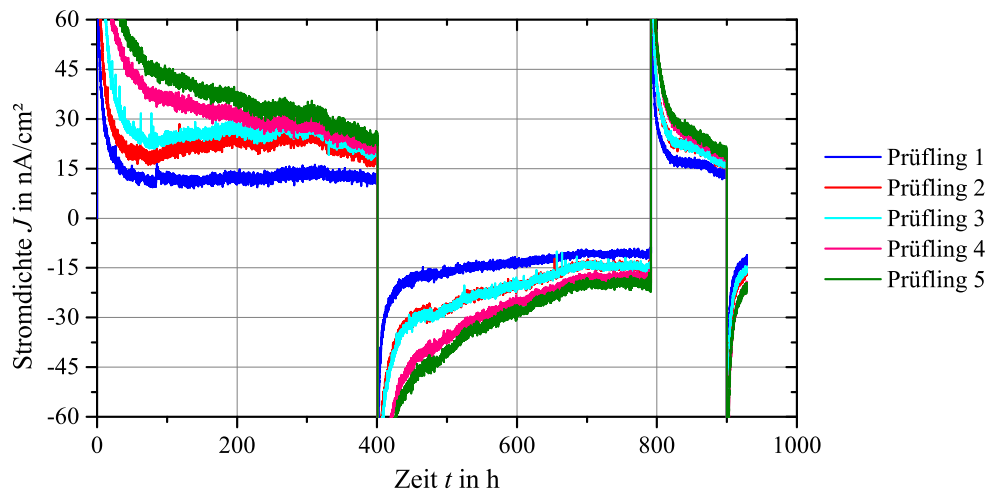


Abbildung 7.50: Ergebnisdarstellung der im 1000-Stunden-Versuch durch die Prüflinge 1 bis 5 gemessenen Stromdichten bei einer Temperatur von 30 °C über 1000 Stunden. Nach 400 Stunden, 800 Stunden und 900 Stunden wurden jeweils Polaritätswechsel durchgeführt.

Die Ergebnisse für 60 °C (Abbildung 7.51) zeigen ein sehr ähnliches Verhalten. Allerdings werden bei den Prüflingen 6 bis 10 etwas höhere Werte der Stromdichte gemessen, was mit dem Ergebnis der Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit korreliert.

Abweichend zu Messungen bei 30 °C und 60 °C werden bei der höchsten Temperaturstufe von 100 °C bereits im Rahmen von Voruntersuchungen innerhalb von wenigen Stunden sehr hohe Werte in der Stromdichte erzielt, welche zu Ausfällen in Form von elektrischen Durchschlägen führen. In Abbildung 7.52 sind an den Rändern der Silberleitlack-Elektroden eines Prüflings, welcher während der Vorversuche versagte,

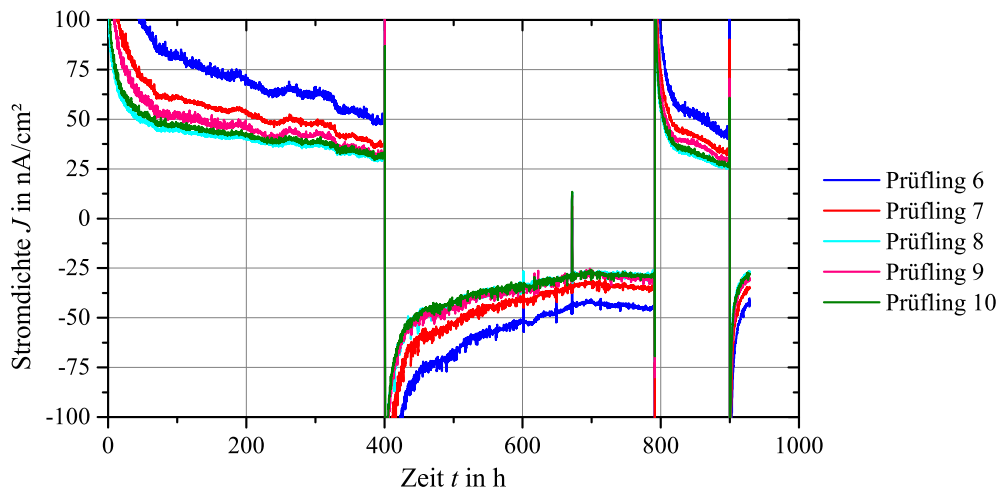


Abbildung 7.51: Ergebnisdarstellung der im 1000-Stunden-Versuch durch die Prüflinge 6 bis 10 gemessenen Stromdichten bei einer Temperatur von 60 °C über 1000 Stunden. Nach 400 Stunden, 800 Stunden und 900 Stunden wurden jeweils Polaritätswechsel durchgeführt.

deutlich Spuren von Kriechweg-Bildungen erkennbar, außerdem ist im Bereich des Durchschlagkanals deutlich Erosion feststellbar.

Aufgrund dieser Ergebnisse der Voruntersuchungen werden sämtliche Prüflinge bei 100 °C mit geringeren Feldstärken beansprucht (im Vergleich zu den Prüflingen bei 30 °C und 60 °C, siehe Tabelle 7.5). Bei niedriger Feldbeanspruchung (Prüfling 11: 1,67 kV/mm, alle weiteren Prüflinge 1,25 kV/mm) überstehen die verwendeten Prüflinge die Prüfdauer von 1000 Stunden ohne Ausfall. In Abbildung 7.53 muss besonderes Augenmerk auf die Skalierung der Stromdichte-Achse gelegt werden, welche bei 100 °C nicht in nA/cm<sup>2</sup>, sondern in µA/cm<sup>2</sup> erfolgt. Nach dem Zuschalten sowie nach jedem Polaritätswechsel zeigt sich das bereits bei den Prüflingen 1 bis 10 festgestellte Abfallen der Stromdichte, vermutlich aufgrund der abklingenden Polarisationsströme. Anschließend ist allerdings bei allen Prüflingen ein kontinuierlicher Anstieg der Stromdichte festzustellen, und es werden vergleichsweise hohe Stromdichten > 1 µA/cm<sup>2</sup> erreicht.

Aufgrund der stark ausgeprägten Polarisationserscheinungen ist eine Erfassung der *E-J*-Kennlinien vor und nach Abschluss des 1000-Stunden-Versuchs nicht sinnvoll. Diese Messung würde bei den 30 °C und 60 °C Prüflingen nach Abschluss des 1000-Stunden-Versuchs deutlich geringere Stromdichten ergeben.

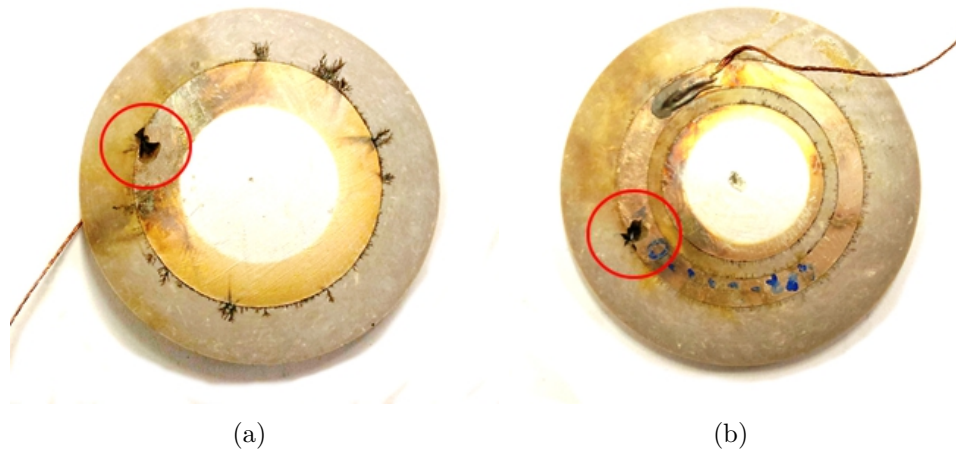


Abbildung 7.52: Fotografien eines Prüflings, welcher bei 100 °C infolge eines elektrischen Durchschlags versagte. (a) Hochspannungsseite; (b) Niederspannungsseite mit Schutzelektrode

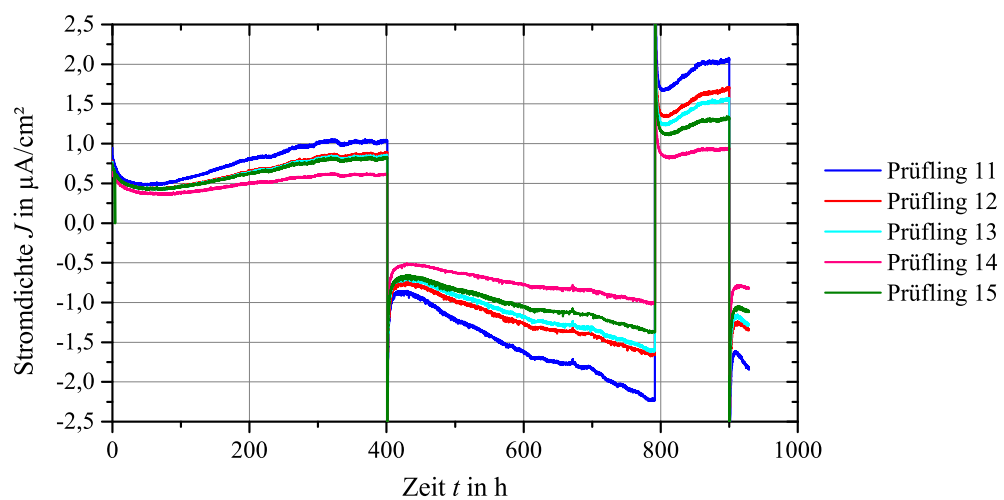


Abbildung 7.53: Ergebnisdarstellung der im 1000-Stunden-Versuch durch die Prüflinge 11 bis 15 gemessenen Stromdichten bei einer Temperatur von 100 °C über 1000 Stunden. Nach 400 Stunden, 800 Stunden und 900 Stunden wurden jeweils Polaritätswechsel durchgeführt. Zu beachten ist die Darstellung der Stromdichte in  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Zusammenfassend kann nach dem ersten Langzeitversuch festgestellt werden, dass die ATO-gefüllten Prüflinge bei 30 °C und 60 °C ein stabiles Verhalten der Volumenstromdichte über 1000 Stunden aufweisen. Die durchgeführten Polaritätswechsel zeigen keinen negativen Einfluss auf das Langzeitverhalten und führen bei keinem der Prüflinge zu elektrischen Durchschlägen. Allerdings zeigen sämtliche Prüflinge bei der höchsten Temperaturstufe von 100 °C ein kritisches Verhalten. Da bereits bei den mikrovaristorgefüllten Prüflingen bei dieser Temperatur besonders kritische Eigenschaften festgestellt wurden, ist davon auszugehen, dass die Ursache dieses Effekts nicht in den Füllstoffpartikeln begründet liegt. Möglicherweise könnte die verwendete Rezeptur der Gießharzprüfkörper einen negativen Einfluss auf das elektrische Verhalten bei hohen Temperaturen haben. Gegen diese Annahme spricht allerdings die Glasübergangstemperatur  $T_G$  von etwa 130 °C, welche somit deutlich oberhalb der 100 °C des Langzeitversuchs liegt. Ein weiterer Erklärungsansatz sind die optisch feststellbaren Entladungsspuren, welche auf eine mögliche Überschreitung der dielektrischen Festigkeit im Bereich der Elektroden-Ränder an der Oberfläche schließen lassen.

### Ergebnisse des zweiten Langzeitversuchs

In einem zweiten 1000-Stunden-Versuch werden erneut bei Temperaturen von 30 °C, 60 °C und 100 °C ATO-gefüllte Prüflinge vermessen. Abweichend zum vorherigen Versuchsablauf wird auf Polaritätswechsel verzichtet. Außerdem wird die an die scheibenförmigen Prüflinge angelegte Prüfspannung  $U$  auf 8 kV angehoben, um Beanspruchungen mit höheren Feldstärken zu erzielen. Insbesondere werden bei diesem Versuch auch Langzeitmessungen an zylindrischen Prüflingen mit Kontaktierung an der Oberfläche realisiert (Prüflinge vgl. Abschnitt 6.2.1). Das Ergebnis der Volumenstrommessung an den scheibenförmigen Segmenten (Prüflinge analog zum ersten 1000-Stunden-Versuch) zeigt auch bei den höheren Feldstärken von 4 kV/mm bei 30 °C einen über der Zeit stetig abfallenden Verlauf, welcher sich einem stabilem Endwert annähert. Dasselbe gilt für die bei 60 °C untersuchten Prüflinge (2 kV/mm). Auch im zweiten Versuch ist wieder ein gegenteiliges Verhalten der Prüflinge bei 100 °C feststellbar, wobei der Stromanstieg nach mehreren 100 Stunden sich im weiteren zeitlichen Verlauf verringert. Die bei 100 °C gemessenen Ströme durch die Prüflinge bei 2 kV/mm liegen deutlich über den bei 30 °C und 60 °C gemessenen. Nach 1000 Stunden beträgt die Differenz rund 3 Dekaden. Allerdings ist auch bei



den Prüflingen bei 100 °C ein Erreichen eines stabilen Endwertes gegen Ende der 1000 Stunden erkennbar. Wie beim ersten Versuch wird die Instabilität nicht auf den Füllstoff zurückgeführt, sondern auf Oberflächenentladungen oder Teilentladungen der Prüflinge (vgl. Abbildung 7.52), welche offenbar durch die hohe Temperatur und die damit verbundene verringerte dielektrische Festigkeit der Luft<sup>21</sup> begünstigt werden.

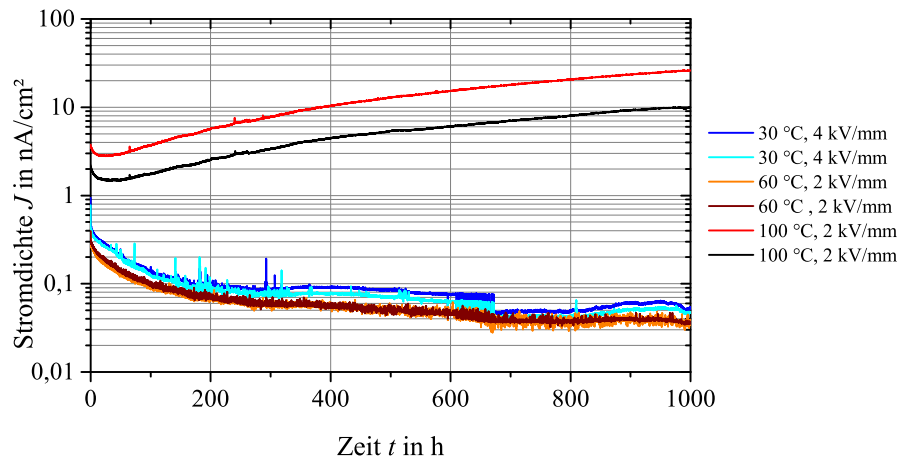


Abbildung 7.54: Ergebnis der Volumenstromdichtemessungen an ATO-gefüllten Prüflingen des zweiten Langzeitversuchs für Prüflinge bei 30 °C, 60 °C und 100 °C.

Von der grundsätzlichen Tendenz zeigt die Messung der Ströme im Bereich der Oberfläche der zylindrischen Prüflinge ( $U/h = 0,67 \text{ kV/mm}$ ) ein zu den Volumenstrommessungen ähnliches Verhalten. Anhand Abbildung 7.55 ist ersichtlich, dass auch bei diesen Messungen bei den beiden niedrigeren Temperaturen (30 °C und 60 °C) die gemessenen Ströme eine konstante bzw. leicht abfallende Tendenz zeigen. Die Stufe in der Stromdichte mancher Prüflinge bei etwa 650 Stunden kann auf einen Fehler im Messsystem zurückgeführt werden, die generelle Tendenz der Stromverläufe bleibt trotzdem erkennbar. Bei 100 °C hingegen schließt sich nach einem anfänglichen Abfall des Stroms  $I$  nach etwa 300 Stunden ein kontinuierlich steigender Verlauf über die gesamte Prüfdauer an.

Vergleicht man die Stromwerte der Oberflächenstromprüflinge mit den Werten der Stromdichte der Volumenstromprüflinge unter Anwendung eines Multiplikationsfak-

<sup>21</sup>Zur Orientierung: Gemäß Norm [IEC 60060-1] Abschnitt 5.3 wird bei dielektrischen Prüfungen eine atmosphärische Korrektur vorgeschrieben. Der Korrekturfaktor gemäß dieser Vorschrift errechnet sich – bei reiner Betrachtung einer Temperaturerhöhung von 20 °C auf 100 °C – zu 0,79. D.h. die dielektrische Festigkeit beträgt nur noch 79 % der ursprünglichen Festigkeit.

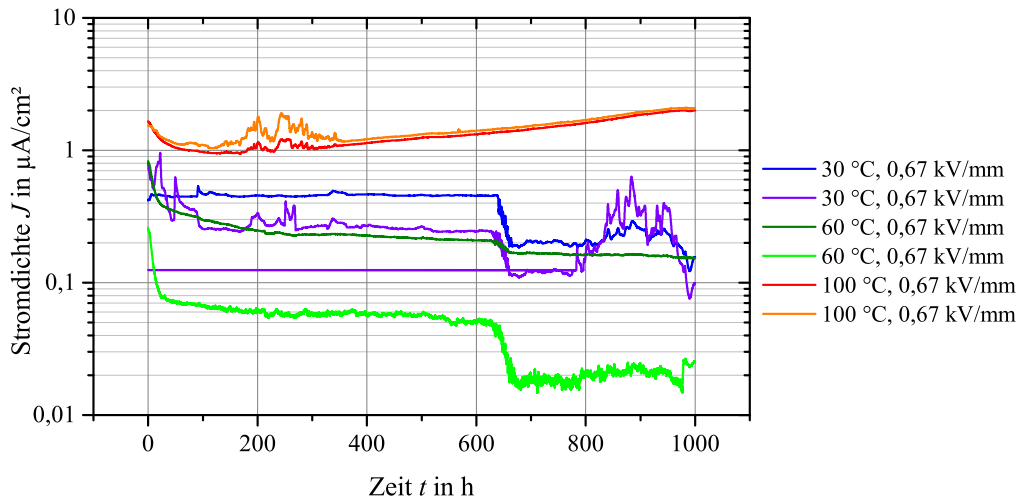


Abbildung 7.55: Ergebnis der 1000-Stunden-Strommessung an der kontaktierten Oberfläche von ATO-gefüllten Prüflingen (vgl. Abschnitt 6.2.1) im Rahmen des zweiten Langzeitversuchs. Dargestellt sind jeweils zwei Prüflinge bei 30 °C, 60 °C und 100 °C bei logarithmischer Darstellung des Stroms  $I$ .

tors von 3,5 zur Umrechnung des Stroms in Stromdichte (vgl. Abschnitt 7.2.2), so sind die Stromdichten der Oberflächenprüflinge höher. Bei 60 °C wird durch Multiplikation des Endwerts von  $I \approx 0,15 \text{ nA}$  eine Stromdichte  $J \approx 0,525 \text{ nA/cm}^2$  erreicht, im Falle der Volumenstromprüflinge allerdings nur etwa  $0,05 \text{ nA/cm}^2$ , trotz deutlich höherer Feldstärken (Volumenstromprüflinge:  $2 \text{ kV/mm}$ , Oberflächenstromprüflinge:  $0,67 \text{ kV/mm}$ ). Bei 100 °C ist der Unterschied wesentlich größer. Multipliziert man hier den Endwert des Oberflächenprüflings ( $I = 2 \text{ μA}$ ) mit dem Faktor 3,5, ergibt sich  $7 \text{ μA/cm}^2$ , im Volumen wurden allerdings lediglich Stromdichten von  $10 \text{ nA/cm}^2$  bzw.  $25 \text{ nA/cm}^2$  gemessen, so dass der Unterschied in diesem Fall fast drei Dekaden beträgt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Kurzzeituntersuchungen und den dort gemessenen Kennlinien für das Volumen und der oberflächennahen Schicht sowie der nachgewiesenen Ausrichtung der Partikel im oberflächennahen Bereich. Die Versuche bei 30 °C und 60 °C zeigten also im Langzeitversuch ein positives Ergebnis. Weiterhin kann aus diesen Untersuchungen festgestellt werden, dass sehr lange Messzeiten notwendig sind, bis sich ein stabiler, stationärer Wert der Stromdichte einstellt.

## 7.3 Zusammenfassung der Messergebnisse

Anhand der zahlreichen Versuche an funktionell gefüllten Polymeren unter Verwendung der Füllstoffpartikel Mikrovaristoren und nanoskalig beschichtete ATO Partikel werden deren elektrische Kennlinien temperatur- und feldstärkeabhängig bestimmt, insgesamt vier Versuche zum temperaturabhängigen Langzeitverhalten mit einer Prüfdauer von jeweils 1000 Stunden durchgeführt und das Verhalten von Prüflingen mit realitätsnahen Abmessungen in Hochspannung-Gleichspannungsversuchen sowie in Stoßspannungsversuchen ermittelt.

Die Versuche an gefüllten Polymeren unter Verwendung von Prototyp-Mustern neuer Mikrovaristoren für Hochfeldanwendungen, welche im Rahmen dieser Arbeit erstmals hergestellt wurden, stellen die generelle Realisierbarkeit von sehr hohen Schaltpunktfeldstärken unter Beweis. Es werden in mikrovaristorgefülltem Epoxidharz Schaltpunktfeldstärken von bis zu 6 kV/mm ermittelt<sup>22</sup>. Eingemischt in Epoxidharz weisen die resultierenden Werkstoffe eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit bei steigender Temperatur auf, analog zum Verhalten von reinem Mikrovaristorpulver. Vergleichende Versuche an diversen mikrovaristorgefüllten HTV-Silikonprüflingen zeigen hingegen das aus der Literatur bekannte Verhalten eines relativ konstanten Temperaturverhaltens. An Prüflingen eines anderen Herstellers wird allerdings auch eine abnehmende Leitfähigkeit bei steigender Temperatur festgestellt. Im Falle der Hochfeld-Mikrovaristoren zeigt sich hingegen, analog zum gefüllten Epoxidharz, eine zunehmende Leitfähigkeit bei steigender Temperatur. Ursächlich hierfür ist die thermische Ausdehnung des Polymers und die Struktur der Mikrovaristoren (sphärisch oder Bruchstücke). Hochspannungsversuche bei Gleichspannung an zylindrischen Prüfkörpern stellen die Machbarkeit von mikrovaristorgefülltem Epoxidharz unter Hochfeldbeanspruchung in einem  $SF_6$ -isoliertem Prüfaufbau auch bei realitätsnahen Abmessungen der Isolatoren unter Beweis. Erste Versuche mit Stoßspannungsbeanspruchung ergeben, dass derart gefüllte Polymere immer in Form eines Durchschlags versagen, welcher in allen Fällen zur Zerstörung des Prüfkörpers führt. Hieraus lässt sich ableiten, dass funktionell gefüllte Polymere mit einer hohen Sicherheitsreserve zu auftretenden, transienten Überspannungen ausgelegt werden müssen bzw. auftretende Überspannungen sicher verhindert werden müssen. Langzeitversuche

---

<sup>22</sup>Die zum Zeitpunkt dieser Arbeit kommerziell verfügbaren mikrovaristorgefüllten Polymere haben eine Schaltpunktfeldstärke von 1 kV/mm.

unter Gleichspannungsbeanspruchung ergeben im Falle der Prototyp-Mikrovaristoren, dass diese auf ihrem aktuellen Entwicklungsstand kein stabiles Verhalten in der Stromdichte aufweisen. Polaritätswechsel haben keinen negativen Einfluss auf das Prüfergebnis und sind als unkritisch zu bewerten. Es wird jedoch anhand von anderen, mikrovaristorgefüllten Polymeren gezeigt, dass sich unter Verwendung von überwiegend sphärischen, nicht vermahlenen Partikeln bei Gleichspannungsbeanspruchung ein stabiles Verhalten der Stromdichte ergibt. Eine Weiterentwicklung der überwiegend aus Bruchstücken bestehenden Mikrovaristorpartikel für Hochfeldbeanspruchung ist erforderlich, aber auch aussichtsreich, um Hochfeld-Mikrovaristoren für Gleichspannungsanwendungen in der Praxis einzusetzen.

Der Einsatz von planaren Glimmerpartikeln mit einer nanoskaligen, antimondotierten Zinnoxidbeschichtung konnte ebenfalls erfolgreich in Epoxidharzprüflingen realisiert werden. Erste Messungen zeigen ein moderat nichtlineares Verhalten des gefüllten Epoxidharzes sowie eine moderate Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur, dies insbesondere auch bei sehr hohen Feldstärken bis zu 6 kV/mm. Infolge der planaren Partikelstruktur und der Ausrichtung der Partikel im Werkstoff weist die oberflächennahe Schicht der hergestellten zylindrischen Prüflinge kürzere Ketten der Partikel auf. Hieraus resultiert eine geringere Anzahl an Potentialbarrieren und demzufolge eine höhere Leitfähigkeit. Neben zahlreichen elektrischen Messungen wird dies auch anhand von REM-Aufnahmen nachgewiesen. Dieser Effekt kann dazu genutzt werden, gezielt eine höhere Leitfähigkeit an der Oberfläche zu realisieren. Durch Abdrehen der oberflächennahen Schicht kann die hohe Leitfähigkeit der Oberfläche jedoch auch, sofern unerwünscht, entfernt werden. Dies bestätigen Messungen an einem Prüfling mit entfernter Oberflächenschicht. Weiterhin ist nach Aussage des Herstellers ein Aufbringen der nanoskaligen Beschichtung auch auf globularen Trägerpartikeln möglich und somit der Formeffekt der Partikel vermeidbar. Hochspannungsversuche an zylindrischen Prüflingen mit nicht abgedrehter Oberfläche zeigen hohe Stromwerte, analog zur Oberflächenmessung, so dass davon auszugehen ist, dass die oberflächennahe Volumenschicht die Leitfähigkeit der Prüflinge dominiert. In den Langzeitversuchen unter Hochfeldbeanspruchung werden bei 30 °C und 60 °C sowohl im Volumen also auch an der Oberfläche abnehmende Stromdichten festgestellt, welche sich auf einen stabilen, konstanten Endwert zu bewegen. Bei 100 °C festgestellte Instabilitäten werden nicht auf den Füllstoff, sondern auf die Randbedingungen der Versuche zurückgeführt. Die verwendeten Partikel wurden bisher noch nicht für

den Einsatz als Isolierwerkstoff für DC-GIS optimiert. Hierfür muss entweder die hohe Leitfähigkeit der Oberfläche mechanisch entfernt oder anhand der Rezeptur der Partikel reduziert werden. Letzteres ist nach Aussage des Herstellers möglich, und es wurde eine Reduzierung der Leitfähigkeit um zwei Dekaden im Rahmen einer Mustercharge in Aussicht gestellt.



## 8 Simulationen

Die in Kapitel 7 gewonnenen, temperatur- und feldstärkeabhängigen Messergebnisse werden verwendet, um die Auswirkung der beiden neuen Isolierstoffe anhand von Feldberechnungen theoretisch zu beleuchten. Hierfür wird ein Modell eines Scheibenisolators mit vereinfachter Geometrie erstellt. Ziel dieser Simulationen ist ein Vergleich zwischen konventionellen Isolatoren mit konstanter Leitfähigkeit und nicht-linear leitfähigen Isolatoren hinsichtlich der elektrischen Feldverteilung, der sich einstellenden elektrischen Leitfähigkeit und der Auswirkung auf die Ansammlung von Ladungsträgern auf der Oberfläche der modellierten Isolatoren.

Als Werkstoffparameter für den Isolator werden für mikrovaristorgefülltes Epoxidharz die Kennlinien gemäß Abbildung 7.8 verwendet. Für *Minatec SCM E12* gefülltes Epoxidharz werden die Kennlinien der Abbildung 7.40 herangezogen. Die erhöhte Oberflächenleitfähigkeit wird in den Betrachtungen dieses Kapitels nicht nachgebildet, d.h. beim modellierten *Minatec SCM E12* gefüllten Isolator wird die Oberflächenschicht entfernt. Zu Vergleichszwecken wird außerdem der Isolator aus einem konventionellen Isolierstoff mit einer konstant angenommenen Leitfähigkeit von  $10^{-13}$  S/m berechnet.

### 8.1 Darstellung des Simulationsmodells

Zur Ermittlung der Wechselwirkungen von Temperaturabhängigkeit und nichtlinearer Leitfähigkeit der Prüflinge wird ein Multiphysik-Simulationsmodell mit einer vereinfachten Geometrie eines Scheibenisolators erstellt. Analog zu den Betrachtungen in Kapitel 4 werden ein Leiter-Radius von 70 mm und ein Radius der Kapselung von 400 mm gewählt und das Modell 2D-axialsymmetrisch erstellt<sup>1</sup>. Die elektrische

---

<sup>1</sup>Verwendet wurde das FEM-Programm *Comsol Multiphysics* in der Version 4.3 b.

Leitfähigkeit des Isoliergases wird zu konstant  $10^{-18}$  S/m gesetzt, das Potential am Innenleiter beträgt +500 kV.

Der Scheibenisolator wird jeweils massiv aus den vermessenen neuen Isolierstoffen nachgebildet. Deren gemessene Temperaturabhängigkeit (Abbildung 7.41) wird im Modell über einen temperaturabhängigen Korrekturfaktor  $k(\vartheta)$  berücksichtigt. Im Falle des Vergleichs-Isolierstoffs mit konstant  $10^{-13}$  S/m wird eine moderate Temperaturabhängigkeit wie folgt nachgebildet: Der Korrekturfaktor steigt von 30 °C bis 60 °C linear auf den Faktor 1,5, und von 60 °C bis 100 °C linear auf den Faktor 10. Diese Temperaturabhängigkeit ist Messungen an einem konventionellem Epoxidharz-Werkstoff entnommen. Für mikrovaristorgefülltes Epoxidharz werden die Werte der Korrekturfaktoren gemäß Tabelle 8.1 verwendet und zwischen den Punkten stückweise kubisch interpoliert und linear extrapoliert.

Tabelle 8.1: Korrekturfaktor  $k(\vartheta)$  zur Anpassung der Leitfähigkeit von mikrovaristorgefülltem Epoxidharz auf die gemessene Temperaturabhängigkeit

Temperatur $\vartheta$ in K	Korrekturfaktor $k(\vartheta)$
293	1
313	4,19
333	17,3
353	53,4

Für *Minatec SCM E12* sind die Werte in Tabelle 8.2 aufgelistet, auch hier wird zwischen den Tabellenwerten stückweise kubisch interpoliert und linear extrapoliert.

Tabelle 8.2: Korrekturfaktor  $k(\vartheta)$  zur Anpassung der Leitfähigkeit von *Minatec SCM E12* gefülltem Epoxidharz auf die gemessene Temperaturabhängigkeit

Temperatur $\vartheta$ in K	Korrekturfaktor $k(\vartheta)$
303	1
333	4,49
373	20,6

Zur thermischen Berechnung werden, ohne Berücksichtigung von Konvektion, die Werte für Gasdichte, Wärmeleitung und spezifischer Wärmekapazität des Isoliergases gemäß den Kennwerten in Tabelle 8.3 linear interpoliert. Die Wärmeleitfähigkeit des Isolators wird zu 1 W/m·K, seine spezifische Wärmekapazität mit 2330 J/kg·K



Tabelle 8.3: Parameter für die thermische Berechnung des Isoliergases [Sol 2013], [NIS 2013]

Temperatur	Wärmeleitfähigkeit	Spezifische Wärmekapazität	Dichte
273 K	0,01 W/m·K	626 J/kg·K	6,52 kg/m <sup>3</sup>
373 K	0,019 W/m·K	770 J/kg·K	4,73 kg/m <sup>3</sup>

und seine Dichte<sup>2</sup> mit 900 kg/m<sup>3</sup> festgelegt, jeweils als konstante Größen. Das 2D-axialsymmetrische Simulationsmodell ist in Abbildung 8.1 dargestellt.

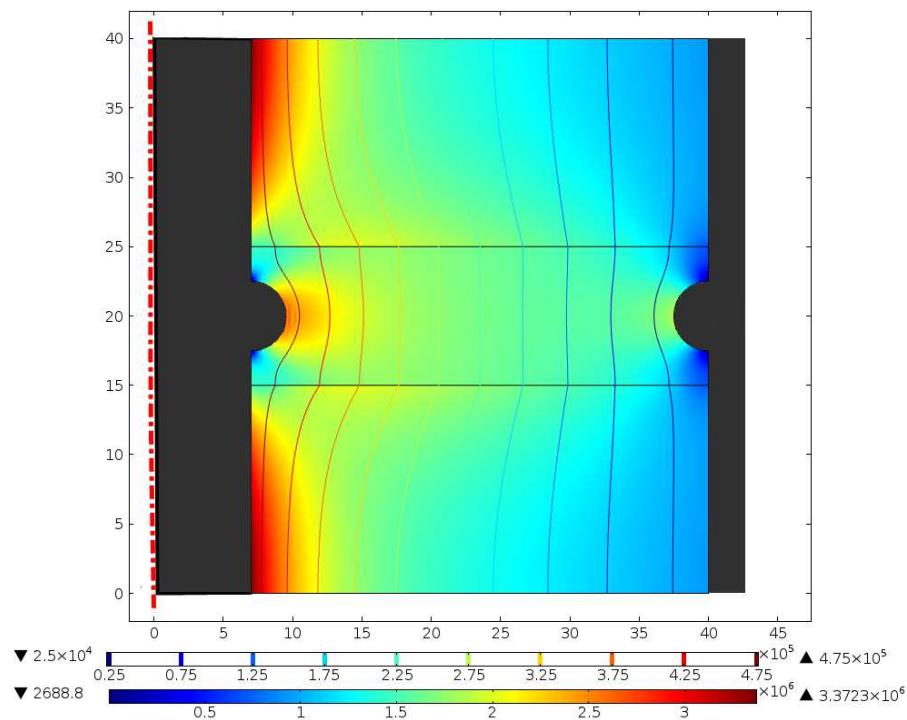


Abbildung 8.1: Darstellung des 2D-axialsymmetrischen Simulationsmodells eines Scheibenisolators mit eingebetteten Elektroden, in dieser Darstellung gelöst mit mikrovaristorgefülltem Epoxidharz. Die Flächenfärbung zeigt den Betrag der elektrischen Feldstärke  $E$  im stationären, resistiven Zustand, weiterhin sind die Äquipotentiallinien dargestellt.

<sup>2</sup>Für die thermischen Berechnungen wird die Vereinfachung getroffen, dass alle Isolierstoffe dieselbe Dichte haben. Vor allem bei mikrovaristorgefüllten Isolierstoffen ist die tatsächliche Dichte jedoch höher.

## 8.2 Feldstärkeabhängige Simulationen

Zunächst soll der Einfluss der Feldstärkeabhängigkeit auf die Feldverteilung der verschiedenen Isolierstoffe betrachtet werden. Deshalb wird die Anordnung zunächst mit einer konstant angenommenen Temperatur von 30 °C nachgebildet und berechnet. In Abbildung 8.2 ist das Ergebnis der feldstärkeabhängigen elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa(E)$  des mikrovaristorgefüllten Isolators dargestellt. Die Werte der Leitfähigkeit variieren zwischen  $6,45 \cdot 10^{-12}$  S/m und  $8,2 \cdot 10^{-11}$  S/m, also um fast eine Dekade.

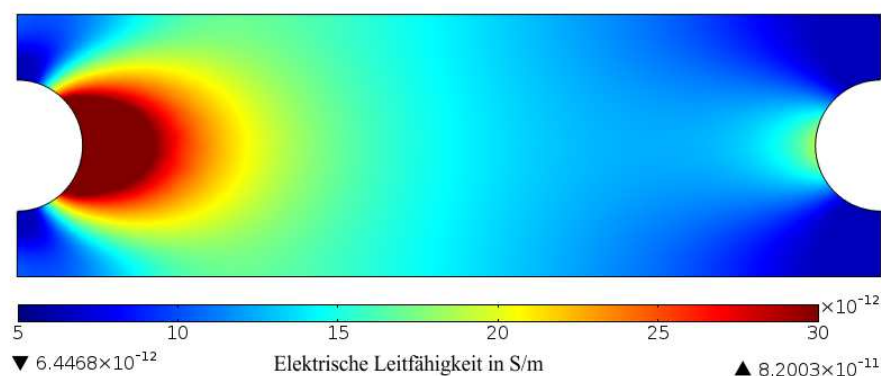


Abbildung 8.2: Darstellung der feldstärkeabhängigen elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa(E)$  des mikrovaristorgefüllten Isolators bei konstant 30 °C nach Erreichen des stationären, resistiven Zustands (▼: Minimalwert, ▲: Maximalwert (außerhalb der Farbskala)).

Abbildung 8.3 zeigt die feldstärkeabhängige elektrische Leitfähigkeit  $\kappa(E)$  des Isolators, welcher mit *Minatec SCME12*-gefülltem Epoxidharz nachgebildet wurde. Hier ist eine deutlich geringere elektrische Leitfähigkeit festzustellen, welche sich im Bereich zwischen  $1,1 \cdot 10^{-13}$  S/m und  $3,92 \cdot 10^{-13}$  S/m (entsprechend einem Faktor von knapp 4) bewegt. Somit ist auch die geringere Nichtlinearität dieses Werkstoffs gut erkennbar.

In beiden Darstellungen ist der stationäre Zustand des Isolators dargestellt, d.h. die Leitfähigkeit, welche sich nach der vollen Ausbildung der Oberflächenladung im Modellisolator eingestellt hat. Als weitere Betrachtung wird die Ladungsverteilung der drei Modelle im stationären Zustand entlang der unteren Grenzfläche Isolator-Isoliergas ausgegeben. Dieses Ergebnis ist in Abbildung 8.4 gezeigt. Der höchste Maximalwert der Ladungsdichte ergibt sich für das Modell mit konstanter Leitfähigkeit, die Maximalwerte für mikrovaristorgefülltes Epoxidharz und *Minatec SCME12*-

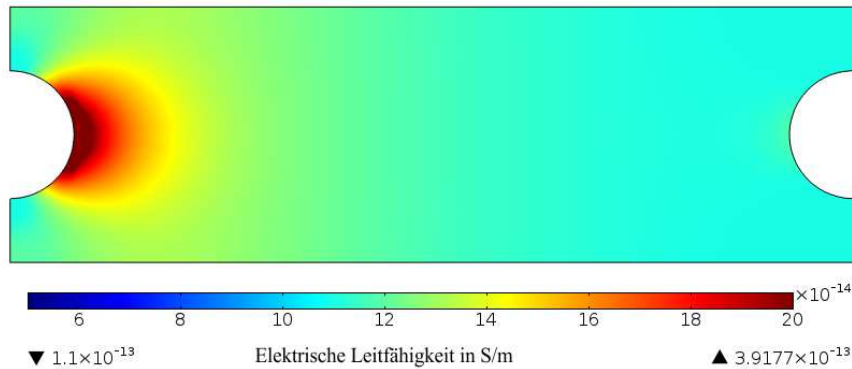


Abbildung 8.3: Darstellung der feldstärkeabhängigen elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa(E)$  des *Minatec SCME12*-gefüllten Isolators bei konstant 30 °C im stationären Zustand ( $t = 3000$  s) (▼: Minimalwert, ▲: Maximalwert (außerhalb der Farbskala)).

gefülltes Epoxidharz sind etwas geringer. Der mikrovaristorgefüllte Isolator weist einen breiten Verlauf der Ladungsdichteverteilung auf, der *Minatec SCME12*-gefüllte Isolator hingegen eine sehr schmale Zone mit hoher Ladungsdichte. Der Verlauf des konstant leitfähigen Isolators befindet sich dazwischen.

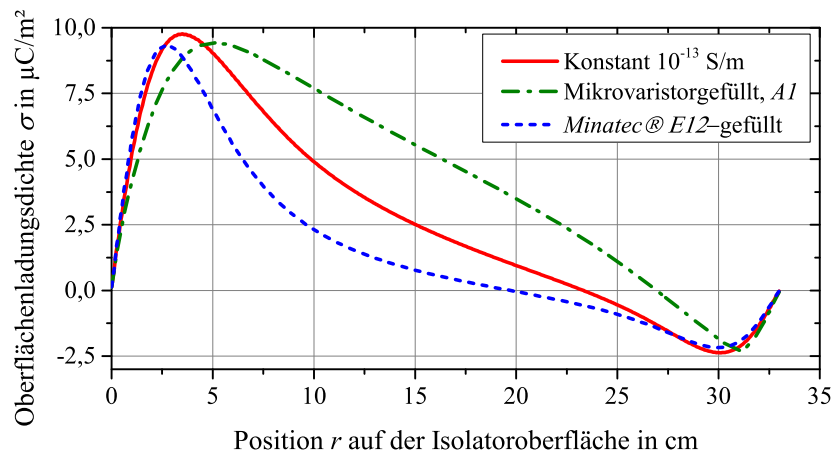


Abbildung 8.4: Stationäre Verteilung der Ladungsansammlung entlang der unteren Oberfläche des modellierten Isolators.

Abbildung 8.5 zeigt die Verläufe der tangentialen Feldstärke  $E_{\text{tan}}$  für alle drei Modellisolatoren, welche ebenfalls entlang der Grenzfläche Isolator-Isoliergas ausgewertet wurde. Der konstant leitfähige Isolator weist auch hier die höchsten Werte der tangentialen Feldstärke auf, im Maximum 25 kV/cm. Das Ergebnis des *Minatec SCME12*-

gefüllten Isolators zeigt einen etwas flacheren Feldverlauf mit einem geringeren Maximum von etwa 22 kV/cm.

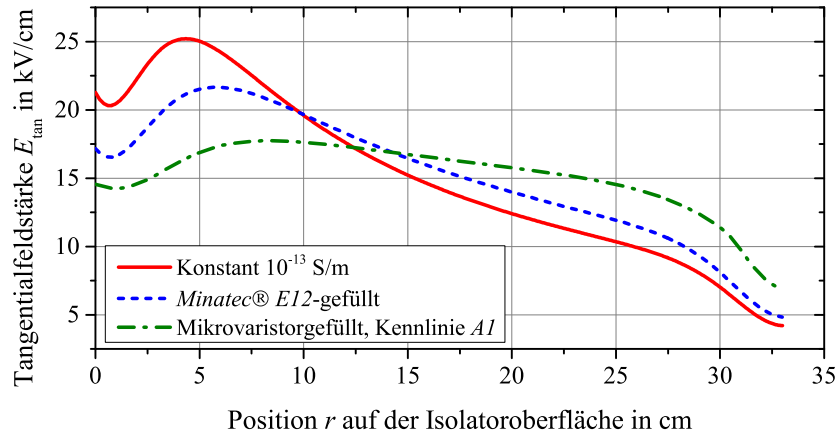


Abbildung 8.5: Tangentialer Feldverlauf  $E_{\text{tan}}$  im stationären Zustand der Ladungsverteilung entlang der unteren Oberfläche des modellierten Isolators.

Ein sehr flacher Verlauf mit nur 17,5 kV/cm im Maximum ergibt sich für den mikrovaristorgefüllten Isolator, aufgrund der hohen Nichtlinearität und der hohen Leitfähigkeit entspricht dies auch der Erwartung. Der Preis für diesen relativ homogenen Feldverlauf ist die hohe resultierende Verlustleistungsdichte, im Maximum über 600 W/m<sup>3</sup> (vgl. Abbildung 8.6).

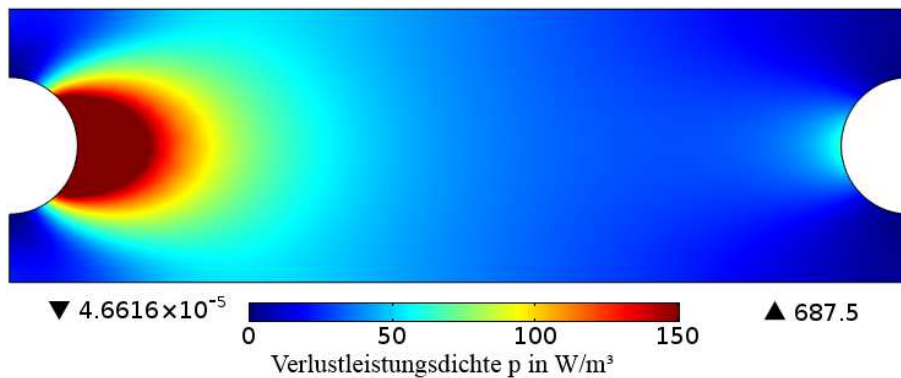


Abbildung 8.6: Verlustleistungsdichte des mikrovaristorgefüllten Isolators bei 30 °C (▼: Minimalwert, ▲: Maximalwert (außerhalb der Farbskala)).

Insgesamt gesehen ergeben sich nach diesen Berechnungen die günstigsten Feld- und Ladungsdichteverteilungen für das Modell des *Minatec SCME12*-gefüllten Isolators, bei gleichzeitig geringer Verlustleistungsdichte.

## 8.3 Temperatur- und feldstärkeabhängige Simulationen

Das Modell gemäß Abbildung 8.1 wird für die folgenden Betrachtungen um einen Temperaturgradienten erweitert. Hierzu wird als realistischer Betriebsfall am Innenleiter eine Temperatur von  $80^\circ\text{C}$  vorgegeben, an der Kapselung  $50^\circ\text{C}$ . Das Multiphysik-Modell wird im ersten Schritt zeitabhängig mit dem thermischen Löser berechnet, bis sich ein thermisch stabiler Zustand eingestellt hat. Diese thermische Lösung wird anschließend als Startbedingung für die zeitabhängige elektrische Betrachtung verwendet. Abbildung 8.7 zeigt die feldstärke- und temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeit des mikrovaristorgefüllten Isolators, welche nun im Bereich zwischen  $2,9 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$  und  $5,8 \cdot 10^{-10} \text{ S/m}$  variiert. Die elektrische Leitfähigkeit ist demzufolge generell um etwa eine Dekade gestiegen. Infolge des Temperaturgradienten zeigt sich die hohe Temperaturabhängigkeit des mikrovaristorgefüllten Polymers also deutlich im Rechenergebnis.

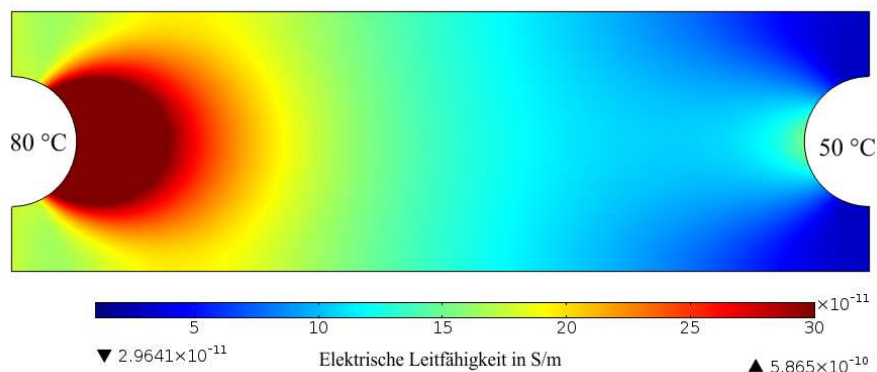


Abbildung 8.7: Darstellung der feldstärke- und temperaturabhängigen elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa(E, \vartheta)$  des mikrovaristorgefüllten Isolators bei  $80^\circ\text{C}/50^\circ\text{C}$  (▼: Minimalwert, ▲: Maximalwert (außerhalb der Farbskala)).

Dies hat dramatische Folgen für die Verlustleistungsdichte, welche nun lokal Werte von über  $2000 \text{ W/m}^3$  erreicht (Abbildung 8.8). Dies würde in der Praxis zu einer erheblichen Erwärmung des Bauteils führen. Hieraus resultiert eine weitere Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit, was zu einem instabilen Zustand bis hin zur Zerstörung des Bauteils führen kann (thermische Instabilität).

Abbildung 8.9 stellt die elektrische Leitfähigkeit des Isolators aus *Minatec SCM E12-*

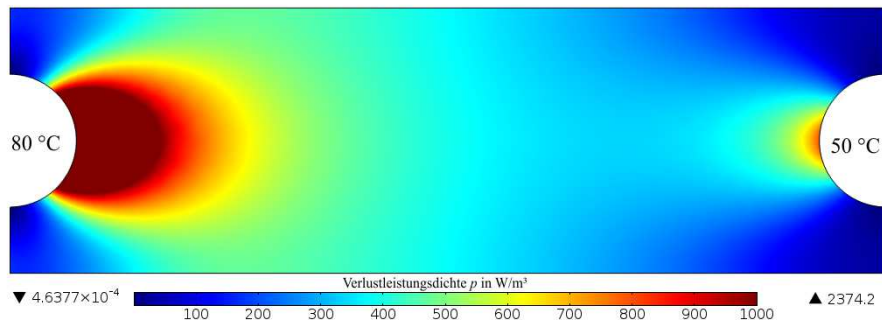


Abbildung 8.8: Darstellung der Verlustleistungsdichte  $p$  des mikrovaristorgefüllten Isolators bei 80 °C/50 °C. Der Maximalwert beträgt 2374 W/m<sup>3</sup> (▼: Minimalwert, ▲: Maximalwert (außerhalb der Farbskala)).

gefülltem Epoxidharz dar, die Werte im Bereich zwischen  $3 \cdot 10^{-13}$  S/m und  $1,6 \cdot 10^{-12}$  S/m sind hier deutlich geringer. Demzufolge sind auch die Verlustleistungsdichten verhältnismäßig niedrig, sie betragen im Maximum der elektrischen Leitfähigkeit direkt an der eingebetteten Hochspannungselektrode lokal rund 10 W/m<sup>3</sup>, im mittleren Bereich des Isolators lediglich 1,5 W/m<sup>3</sup>.

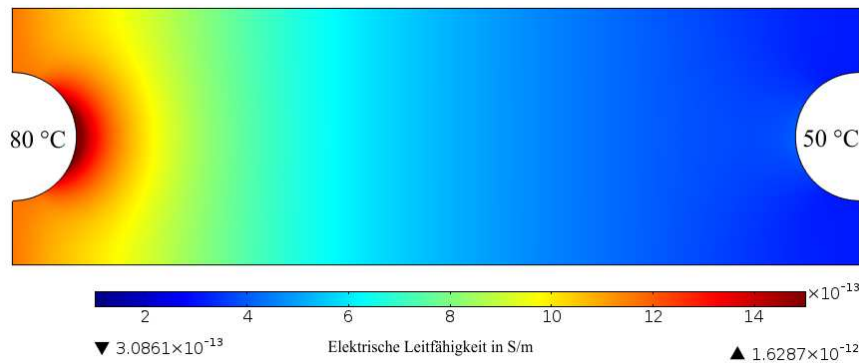


Abbildung 8.9: Darstellung der feldstärke- und temperaturabhängigen elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa(E, \vartheta)$  des *Minatec SCM E12*-gefüllten Isolators bei 80 °C/50 °C (▼: Minimalwert, ▲: Maximalwert (außerhalb der Farbskala)).

Verursacht durch den Temperaturgradienten ergibt sich ein vollkommen abweichender Verlauf der tangentialen Feldstärke  $E_{\text{tan}}$  entlang der Isolatoren, vgl. Abbildung 8.10. Insgesamt sind die maximal auftretenden Feldstärken reduziert. Auch bei diesen Betrachtungen ist der höchste Wert der maximal auftretenden Tangentialfeldstärke für den Isolator mit  $10^{-13}$  S/m mit geringer Temperaturabhängigkeit vorzufinden. Dieser beträgt nun nur noch etwa 19 kV/cm. Beim Isolator aus *Minatec SCM E12*-gefülltem

Epoxidharz und beim mikrovaristorgefüllten Isolator beträgt der Maximalwert jeweils etwa 17 kV/cm. Während das Maximum beim *Minatec SCM E12*-gefüllten Isolator nach wie vor hochspannungsseitig vorzufinden ist, hat beim mikrovaristorgefüllten Isolator bereits Feldinversion stattgefunden, und das Maximum befindet sich im Bereich der Erdelektrode.

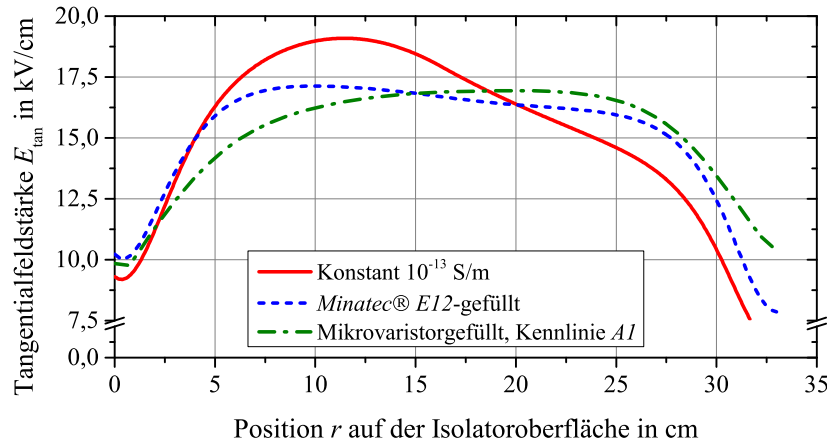


Abbildung 8.10: Verlauf der Tangentialfeldstärke der drei Modellisolatoren im stationären Zustand der Ladungsansammlung mit Temperaturgradient 80 °C/50 °C. Ausgabe des Ergebnisses entlang der unteren Grenzfläche Isolator-Isoliergas.

Die Verteilung der Oberflächenladung entlang der unteren Grenzfläche Isolator-Isoliergas (Abbildung 8.11) zeigt nun bei allen drei modellierten Isolatoren höhere Maximalwerte, insbesondere im Falle des Isolators mit  $10^{-13}$  S/m und geringer Temperaturabhängigkeit. Nachdem die Feldbetrachtung geringere Maximalwerte zeigte, ist hier die Situation infolge des Temperaturgradienten also schlechter geworden. Durch den Einsatz von mikrovaristorgefülltem Epoxidharz oder *Minatec SCM E12*-gefülltem Epoxidharz kann dem allerdings entgegen gewirkt werden. Für diese beiden Modelle wird der Maximalwert um etwa 15 % reduziert. Zusammenfassend haben die neuen Werkstoffe auch bei der Betrachtung mit Temperaturgradienten einen positiven Einfluss, wobei die Leitfähigkeit des mikrovaristorgefüllten Polymers nun zu hoch liegt und daher auch eine Feldinversion eintritt. Demzufolge kann auch in diesem Fall das beste Ergebnis mit dem Einsatz von *Minatec SCM E12*-gefülltem Epoxidharz erzielt werden.



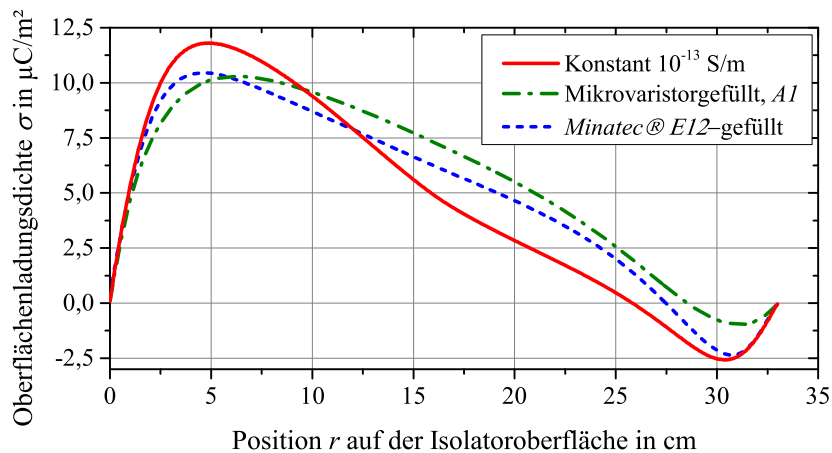


Abbildung 8.11: Vergleich der Oberflächenladungsdichten entlang der unteren Oberfläche der drei modellierten Isolatoren, jeweils unter Anwendung eines Temperaturgradienten  $80^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$ .

## 8.4 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Das Ergebnis der Simulationen zeigt, dass sowohl der Isolator aus mikrovaristorgefülltem Epoxidharz als auch der *Minatec SCM E12*-gefüllte Isolator in der feldstärkeabhängigen Berechnung im stationären Zustand eine günstigere elektrische Verteilung der Tangentialfeldstärke mit deutlich geringeren Maximalwerten aufweisen. Hinsichtlich Oberflächenaufladung können ähnliche Maximalwerte festgestellt werden. Im Falle des *Minatec SCM E12*-gefüllten Isolators ist die Aufladung mit hohen Oberflächenladungsdichten auf einen deutlich kleineren Bereich der Oberfläche beschränkt.

Bei den Berechnungen mit einem Temperaturgradienten von  $80^{\circ}\text{C}$  am Innenleiter und  $50^{\circ}\text{C}$  an der Kapselung des Modells der GIS-Isolieranordnung zeigen sich deutliche Abweichungen im Vergleich zu einer konstanten Temperatur. Die maximalen tangentialen Feldstärken entlang der Isolatoren sind insgesamt geringer und homogener verteilt. Im Falle des mikrovaristorgefüllten Isolators findet Feldinversion statt. Dies ist auf die sehr hohe Temperaturabhängigkeit dieses Isolierstoffs zurückzuführen, welche sich auch in der Erhöhung der Leitfähigkeit ausdrückt und somit zu inakzeptabel hohen elektrischen Leitfähigkeiten und Verlusten führt. Bezüglich Oberflächenladungsdichte sind sowohl mikrovaristorgefülltes Epoxidharz als auch *Minatec SCM E12*-gefülltes Epoxidharz positiv zu bewerten, da die maximale Dichte



in beiden Fällen um rund 10 % reduziert wird.

Insgesamt betrachtet führt das *Minatec SCM E12*-gefüllte Epoxidharz zum besten Gesamtergebnis, da mit diesem Werkstoff eine gute Feldverteilung, eine Verringerung der Oberflächenaufladung und akzeptable, geringe Verluste erzielt werden können. Wenn bei mikrovaristorgefülltem Epoxidharz die hohe Temperaturabhängigkeit vermieden werden kann (z.B. durch Weiterentwicklung), stellt auch dieser Werkstoff eine attraktive Alternative zu konventionellen Isolierwerkstoffen dar.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte das Ziel der Herstellung und Charakterisierung neuartiger, funktionell gefüllter Werkstoffe für Hochfeld-Gleichspannungs-Isoliersysteme erreicht werden. Als Füllstoffe werden primär verschiedene Prototypen von Hochfeld-Mikrovaristoren verwendet. Mikrovaristorgefüllte Polymere für Hochfeldanwendungen sind bisher noch nie hergestellt und charakterisiert worden und stellen daher eine absolute Neuheit dar. Als zweite Füllstoffgruppe werden nanoskalig mit antimondotiertem Zinnoxid (ATO) beschichtete planare Glimmerpartikel des Typs *Minatec SCM E12* verwendet. Diese Partikel wurden ursprünglich zur Substitution von Siliziumcarbid als Füllstoff in Endenglimmschutzsystemen elektrischer Maschinen entwickelt. Eingemischt in Epoxidharz ermöglichen sie erstmals den Einsatz eines ATO-gefüllten Werkstoffs für sehr geringe Leitfähigkeiten bei hohen Feldstärken.

Die für gasisolierte Gleichspannungsanlagen benötigten Parameter werden mittels theoretischer Betrachtungen und anhand von FEM-Simulationen evaluiert. Anschließend wurden verschiedene Hersteller von Füllstoffpartikeln angesprochen und geeignete Partikel, meist Prototypen, durch die Hersteller zur Verfügung gestellt. Durch die Entwicklung und den Aufbau verschiedener Prüfaufbauten können die hergestellten Prüflinge umfangreich charakterisiert werden. Hierbei stellt sich bei mikrovaristorgefülltem Epoxidharz heraus, dass es möglich ist, deutlich höhere Schaltpunktfeldstärken von etwa 6 kV/mm zu erzielen<sup>1</sup>. Ebenso ermöglicht der *Minatec SCM E12*-gefüllte Werkstoff erstmals den Einsatz von ATO-gefüllten Isolierwerkstoffen für hohe Feldstärken und sehr geringe Leitfähigkeiten.

Das mikrovaristorgefüllte Epoxidharz weist eine ausgeprägte Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur auf. In Messreihen an mikrovaristorgefüllten HTV-Silikon-Prüflingen wird gezeigt, dass eine Interaktion zwischen thermischer

---

<sup>1</sup>Bis dato sind lediglich mikrovaristorgefüllte Polymere mit einer Schaltpunktfeldstärke von 1 kV/mm am Markt erhältlich.

Ausdehnung des gefüllten Polymers und der Struktur der verwendeten Mikrovaristoren das Temperaturverhalten maßgeblich beeinflusst. Je nach Kombination von Polymer und Art des Mikrovaristorpulvers sind eine Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit, eine in Grenzen konstante elektrische Leitfähigkeit oder eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit feststellbar.

In Hochspannungsversuchen in einem gasisolierten Versuchsaufbau unter Gleichspannungsbeanspruchung wird die hohe Schaltpunktfeldstärke des mikrovaristorgefüllten Epoxidharzes auch an Isolierkörpern mit produktnahen Abmessungen nachgewiesen. Bei Stoßspannungsbeanspruchung zeigt sich, dass die Prüflinge immer in Form eines Durchschlags durch das Volumen versagen und hierdurch irreversibel zerstört werden. Demnach muss in der Anwendung ein hoher Sicherheitsabstand gewahrt werden, um Schäden zu verhindern.

Anhand von Langzeituntersuchungen mit einer Versuchsdauer von 1000 Stunden bei kombinierter thermischer und elektrischer Beanspruchung mit Gleichspannung zeigt das mikrovaristorgefüllte Polymer einen über lange Zeiträume deutlichen Anstieg in der Stromdichte, welcher sich einem stabilen Endwert annähert. Dieser liegt allerdings deutlich höher als der ursprüngliche Startwert der Stromdichte. Zudem ist eine Verschiebung der nichtlinearen  $E$ - $J$ -Kennlinie in Richtung höherer Leitfähigkeiten feststellbar. Bei den Langzeitversuchen wird festgestellt, dass die Struktur des verwendeten Mikrovaristorpulvers eine entscheidende Rolle spielt. Sphärische Mikrovaristoren mit wenig Bruchstücken und geringer Schaltpunktfeldstärke weisen, eingemischt in Epoxidharz, ein stabiles Langzeitverhalten auf. Durch das Einmischen von Mikrovaristoren mit überwiegend zermahlenen Bruchstücken in das selbe Epoxidharz geht das stabile Verhalten des resultierenden Werkstoffs jedoch verloren. Hohe Schaltpunktfeldstärken bzw. kleine Partikelgrößen<sup>2</sup> dürfen vom Hersteller der Partikel also nicht durch Zermahlen des Füllstoffs erzeugt werden.

Insgesamt sind die Untersuchungsergebnisse der mikrovaristorgefüllten Polymere vielversprechend. Für den Einsatz derart gefüllter Werkstoffe in der Praxis muss allerdings seitens der Hersteller von Mikrovaristorpulver eine Weiterentwicklung zur Ermöglichung langzeitstabiler mikrovaristorgefüllter Polymere für hohe Feldstärken mit verringerter Temperaturabhängigkeit erfolgen. Sobald dies abgeschlossen ist,

---

<sup>2</sup>Zum Erreichen einer geringen Sedimentationsneigung beim Verguss.

---

stellen mikrovaristorgefüllte Polymere auch für Hochfeldanwendungen bei Gleichspannungsbeanspruchung einen attraktiven Werkstoff zur Feldsteuerung dar.

Bei *Minatec SCM E12*-gefüllten Epoxidharz-Prüflingen wird eine moderate Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Feldstärke und der Temperatur ermittelt. Die Volumenleitfähigkeit  $\kappa_V$  des gefüllten Werkstoffs liegt im Bereich von  $10^{-13}$  S/m (30 °C, 1 kV/mm) bis  $10^{-11}$  S/m (100 °C, 6 kV/mm). Durch Erwärmung von 30 °C auf 100 °C steigt die Leitfähigkeit lediglich um eine Dekade an. Dies kann bei Temperaturgradienten entlang eines Isoliersystems erhebliche Vorteile gegenüber konventionellen Isolierwerkstoffen mit sich bringen. Bei hohen Temperaturgradienten kann hierdurch eine Feldinversion verhindert werden. Der Nichtlinearitätsexponent  $\alpha(E)$  beträgt im Volumen etwa 2 bis 3. Aufgrund des Formfaktors der planaren Füllstoffpartikel ergibt sich im Bereich der Oberfläche eine im Vergleich zum Volumen deutlich höhere Leitfähigkeit. Eine parallele Ausrichtung der planaren Partikel ist hierfür verantwortlich. Diese wird anhand von REM-Aufnahmen nachgewiesen. Auch wird im Bereich der Oberfläche ein etwas höherer Nichtlinearitätsexponent  $\alpha(E)$  von 3 bis 3,5 ermittelt.

In Hochspannungsversuchen werden relativ hohe Leitfähigkeiten gemessen. Dies liegt in der oberflächennahen Schicht und der dort vorherrschenden Ausrichtung der Partikel zur Oberfläche begründet. Bei Stoßspannungsversuchen werden, im Vergleich zum mikrovaristorgefüllten Epoxidharz, deutlich höhere Versagens-Spannungen ermittelt. Das Erreichen der Versagensspannung führt zu keiner Beschädigung der Prüflinge, demzufolge wird ein Überschlag entlang der Oberfläche oder ein Gasdurchschlag vermutet.

Auch an Prüflingen aus *Minatec SCM E12*-gefülltem Epoxidharz werden Langzeitversuche durchgeführt. Hierbei zeigte sich bei 30 °C und 60 °C zunächst eine abnehmende Leitfähigkeit, welche sich einem stabilen Endwert annähert. Das Erreichen des stabilen Endwerts dauert mehrere hundert Stunden und zeigt deutlich den Einfluss der Messzeit bei Gleichspannungs-Isoliersystemen. Dieses stabile Ergebnis der Langzeitversuche gilt gleichermaßen für Messungen durch das Volumen der Prüflinge wie für das oberflächennahe Volumen mit paralleler Ausrichtung der Partikel. Bei 100 °C werden auch im Falle aller *Minatec SCM E12*-gefüllten Epoxidharz-Prüfkörper eine im zeitlichen Verlauf steigende elektrische Leitfähigkeit und somit ein instabiles Verhalten beobachtet. Nach Angabe des Herstellers der Partikel sind diese

jedoch durchaus auch für hohe Temperaturen oberhalb 100 °C geeignet. Da bereits bei den mikrovaristorgefüllten Prüflingen bei 100 °C ein besonders instabiles Verhalten gemessen wurde, wird derzeit davon ausgegangen, dass die Ursache in der Werkstoffkombination begründet liegt.

Die Auswirkungen der neuen Isolierstoffe werden anhand des Modells eines Scheibenisolators für eine 500-kV-DC-GIS in FEM-Simulationen untersucht. Die gewonnenen Messergebnisse an mikrovaristorgefülltem Epoxidharz und *Minatec SCM E12*-gefülltem Epoxidharz werden hierzu als Eingabeparameter verwendet. Das Modell wird unter Berücksichtigung der Feldstärke- und Temperaturabhängigkeit zeitabhängig berechnet. Neben einer Berechnung mit homogener Temperaturverteilung entlang des Isolators wird auch ein Temperaturgradient infolge der Temperatur des Innenleiters nachgebildet.

Die Berechnungen zeigen, dass die beiden neu entwickelten Isolierstoffe einen positiven Einfluss auf die elektrische Feldverteilung haben und eine Reduzierung der Ladungsansammlung auf der Oberfläche des Isolators bewirken. Hohe Ladungsansammlungen führen bei konventionellen Isolierstoffen zu einer deutlichen Reduzierung der dielektrischen Festigkeit, dies ist insbesondere beim Auftreten von transienten Überspannungen oder bei einer Polaritätsumkehr kritisch. Im Falle des mikrovaristorgefüllten Epoxidharzes sind allerdings die entstehenden elektrischen Verluste deutlich zu hoch. Dies gilt insbesondere für die Betrachtung mit heißem Innenleiter und Temperaturgradient, welche den Gegebenheiten in praktischen Anlagen entspricht. Ursache hierfür ist vor allem die hohe Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur. Die Berechnungen für *Minatec SCM E12*-gefülltes Epoxidharz hingegen zeigen geringe Verlustleistungsdichten, welche unter Berücksichtigung der besseren Feldverteilung und des raschen Ladungsabflusses als akzeptabel einzustufen sind.

Der Einsatz von Mikrovaristoren für hohe Schaltpunktfeldstärken sollte aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse dieser Arbeit weiter verfolgt werden. Eine Weiterentwicklung der Prototyp-Mikrovaristoren könnte zielführend für den Einsatz als Füllstoff in feldsteuernden Werkstoffen für Hochfeld-Isoliersysteme sein. Hierbei sollten die neuen mikrovaristorgefüllten Werkstoffe so ausgelegt werden, dass die Betriebsfeldstärke deutlich unterhalb der Schaltpunktfeldstärke  $E_b$  liegt und die Prüffeldstärken den Wert von  $E_b$  nicht zu sehr überschreiten.

Die verwendeten *Minatec SCM E12*-Partikel zeigen bereits heute Eigenschaften,

---

welche sie für den Einsatz in Hochfeld-Gleichspannungs-Isoliersystemen geeignet erscheinen lassen. Versuchsreihen mit unterschiedlichen Füllstoffgehalten und ggf. auch anderen Epoxidharz-Formulierungen sollten daher diese Art von gefülltem Werkstoff weiter charakterisieren. Neben den bisher verwendeten *Minatec SCM E12*-Partikeln sollten auch Partikel mit noch geringerer Leitfähigkeit (Größenordnung  $10^{-14}$  S/m), welche der Hersteller in Aussicht gestellt hat, untersucht werden. Der optimale Bereich der elektrischen Leitfähigkeit für Hochfeld-Isoliersysteme liegt im Bereich zwischen  $10^{-12}$  S/m und  $10^{-14}$  S/m. Weiterhin ist die Applikation der nanoskaligen, halbleitenden ATO-Beschichtung auf globulare Partikel für Volumenfüllstoffe denkbar und ein vielversprechender Ansatz, wenn eine höhere Leitfähigkeit der Oberfläche (d.h. eine ausgeprägte Anisotropie) wie im hier vorliegenden Fall der planaren Partikel unerwünscht ist.

Die gefüllten Isolierstoffe sollten in weiteren Langzeituntersuchungen hinsichtlich Alterung und zu erwartender Lebensdauer untersucht werden. Das Verhalten bei Stoßspannungsbeanspruchung, welches in dieser Arbeit erst in orientierenden Versuchen an geringen Stückzahlen untersucht wird, muss systematisch an einer hohen Anzahl von Prüflingen evaluiert werden. Aufgrund der nichtlinearen Eigenschaft der Werkstoffe sollte hierzu auch das maximale Energieaufnahmevermögen in Versuchen mit Stoßstrom-Beanspruchung ermittelt werden.

Sofern in weiteren Untersuchungen die bisher gewonnenen, positiven Ergebnisse bestätigt werden können, stellen die vorgestellten Isolierstoffe sinnvolle Alternativen zu den bisher verwendeten, konventionellen Isolierwerkstoffen dar. Hierdurch könnten besonders kompakte, gasisolierte HGÜ-Anlagen bereitgestellt werden und demzufolge Kosten, Platz und Umweltbeeinträchtigung minimiert werden.





# Literaturverzeichnis

## Literatur

- [ABB 1999] ABB AG. *Schaltanlagen*. 10. Auflage. ABB Calor Emag Schaltanlagen AG, Mannheim, 1999.
- [Auc 1997] D. W. Auckland, W. Su und B. R Varlow. „Nonlinear fillers in electrical insulation“. In: *IEE Proc. Sci. Meas. Technology* 144.3 (1997), Seiten 127–133. ISSN: 1350-2344.
- [Bär 2010] Roland Bärsch und Andreas Küchler. „Beanspruchungen und elektrisches Verhalten von Isoliersystemen bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchungen“. In: *ETG Fachbericht 125 Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung* (2010), Paper 1.3. ISSN: 0341-3934.
- [Bat 2005] Matthias Batzill und Ulrike Diebold. „The surface and materials science of tin oxide“. In: *Progress in Surface Science* Vol. 79 (2005), Seiten 47–154. ISSN: 0079-6816.
- [Ber 2013] Thomas Berg, Mohammad Zamani, Michael Muhr und Denis Imaovic. „Investigations of conductive Particles in Gas Insulated Systems under DC-Conditions“. In: *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (2013), Seiten 1000–1003.
- [Bey 1983] Manfred Beyer u.a. *Epoxidharze in der Elektrotechnik*. Expert Verlag, 1983. ISBN: 3-88508-792-8.
- [Bey 1992] Manfred Beyer, Wolfram Boeck, Klaus Möller und Walter Zaengl. *Hochspannungstechnik - Theoretische und praktische Grundlagen*. Springer, 1992. ISBN: 978-3-642-64893-9.

- [Boe 2001] B. Boettcher, G. Malin und R. Strobl. „Advanced Stress Control System based on ZnO Technology“. In: *ISH 2001* (2001).
- [Chr 2010] Thomas Christen, Lise Donzel und Felix Greuter. „Nonlinear Resistive Electric Field Grading Part 1: Theory and Simulation“. In: *IEEE DEIS Electrical Insulation Magazine* Vol. 26 No. 6 (2010), Seiten 47–59. ISSN: 0883-7554.
- [Cig 2012a] Cigré Working Group D1.03. *Gas Insulated System for HVDC: DC Stress at DC and AC Systems*. Technical Brochure 506. 2012.
- [Cig 2012b] Cigré Working Group D1.12. *Material properties of solid HVDC insulation systems*. Technical Brochure 520. 2012.
- [Cla 1999] David R. Clarke. „Varistor Ceramics“. In: *Journal of the American Ceramic Society* Vol. 82, Issue 3 (1999), Seiten 485–502. ISSN: 1551-2916.
- [Cla 2008] Horst Clausert, Gunther Wiesemann, Volker Hinrichsen und Jürgen Stenzel. *Grundgebiete der Elektrotechnik 1*. 10. überarbeitete Auflage, Oldenbourg Verlag, 2008. ISBN: 978-3-48657-697-9.
- [Coo 1982] C. M. Cooke, R. Nakata, M. Ouyang, S. J. Dale und T. F. Garritty. „Compressed gas insulation for advanced HVDC transmission equipment“. In: *Cigre SC-15 Session, Paper 15-14* (1982).
- [Deb 2011] J. Debus und V. Hinrichsen. „Microvaristor Filled Stress Grading Systems For High-Voltage Rotating Electrical Machines“. In: *22nd Nordic Insulation Symposium, 13. - 15. Juni 2011, Tampere, Finland* 22 (2011).
- [Deb 2015] Jan Debus. „Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten mikrovaristorgefüllter Feldsteuerelemente in der elektrischen Energietechnik“. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2015.
- [Dit 2011] F. Dittmann. *Überwindung der Distanz - 125 Jahre Gleichstromübertragung Miesbach - München. 125 Jahre elektrische Energieübertragung*. Offizieller Bericht über die Internationale Elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt am Main, 2011. ISBN: 978-3-80073-192-3.

- 
- [Don 2004] L. Donzel, T. Christen, R. Kessler, F. Greuter und H. Gramespacher. „Silicone Composites for HV Applications based on Microvaristors“. In: *IEEE International Conference on Solid Dielectrics* Vol. 1 (2004), Seiten 403–406. ISSN: 0811-6429.
- [Don 2011] L. Donzel, F. Greuter und Th. Christen. „Nonlinear Resistive Electric Field Grading Part 2: Materials and Applications“. In: *IEEE DEIS Electrical Insulation Magazine* Vol. 27 No. 2 (2011), Seiten 18–29. ISSN: 0883-7554.
- [Ein 1979] R. Einzinger. „Grain Junction Properties of ZnO Varistors“. In: *Applications of Surface Science* Vol. 3 (1979), Seiten 390–408.
- [Ein 1982] R. Einzinger. „Nichtlineare elektrische Leitfähigkeit von dotierter Zinkoxid-Keramik“. Dissertation. TU München, 1982.
- [Els 2000] O. Elsässer, K. Feser und F. Messerer. „Flashover behavior of semi-conducting glazed insulators under positive lightning impulse stress at different climatic conditions“. In: *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* Vol. 1 (2000), Seiten 203–206.
- [Fuj 1989] Hideo Fujinami, Tadasu Takuma, Masafumi Yashima und Tadashi Kawamoto. „Mechanism and Effect of DC charge Accumulation on SF6 Gas Insulates Spacers“. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* Vol. 4 (1989), Seiten 1765–1772. ISSN: 0885-8977.
- [Gha 1980] D. B. Ghare und C. R. Varadaraj. „Nonlinear I-V characteristics of semiconducting paints“. In: *Indian Institute of Science* Vol. 62 (A) (1980), Seiten 83–88.
- [Gla 1996] J. Glatz-Reichenbach, B. Meyer, R. Strümpfer, P. Kluge-Weiss und Felix Greuter. „New low-voltage varistor composites“. In: *Journal of Material and Science* Vol. 31 (1996), Seiten 5941–5944. ISSN: 0022-2461.
- [Gor 2000] Roy G. Gordon. „Criteria for Choosing Transparent Conductors“. In: *Material Research Society: MRS Bulletin, August 2000* Vol. 25 (2000), Seiten 52–57.

- [Gra 2003] H. Gramespacher, F. Greuter, L. Donzel und Th. Christen. „Microvaristoren für Feldsteuerelemente in Kabelendverschlüssen“. In: *ETG Workshop: Silikonelastomere-Werkstoffe für Kabelgarnituren, Isolatoren, Überspannungsableiter* Vol. 93 (2003), Seiten 69–72. ISSN: 0341-3934.
- [Gre 1990] F. Greuter und G. Blatter. „Electrical properties of grain boundaries“. In: *Semiconductor Science and Technology* Vol. 5 (1990), Seiten 111–137. ISSN: 0268-1242.
- [Gre 2004] F. Greuter, M. Siegrist, P. Kluge-Weiss, R. Kessler, L. Donzel, R. Loitzl und H.J. Gramespacher. „Microvaristors : functional fillers for novel electroceramic composites“. In: *Journal of Electroceramics* Vol. 13 (2004), Seiten 739–744.
- [Gup 1990] Tapan K. Gupta. „Application of Zinc Oxide Varistors“. In: *Journal of the American Ceramic Society* 73 (1990), Seiten 1817–1840.
- [Has 1997] T. Hasegawa, K. Yamaji, M. Hatano, F. Endo, T. Rokunohe und T. Yamagiwa. „Development of insulation structure and enhancement of insulation reliability of 500 kV DC GIS“. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* Vol. 12 (1997), Seiten 194–202. ISSN: 0885-8977.
- [Hav 2000] Wolfgang Haverkamp, Gerold Malin und Robert Strobl. „Termination System for Polymeric Distribution Cables Based on Ceramic Stress-Grading Technology“. In: *Power Journal of the South African Institute of Electrical Engineers* (2000), Seiten 68–71.
- [Hei 2009] Lothar Heinemann und Franz Besold. „Kompakt und zuverlässig - Fortschritt über mehrere Jahrzehnte: gasisolierte Schaltanlagen von 52 bis 1.100 kV“. In: *ABB Technik* 1 (2009), Seiten 92–98. ISSN: 1013-3143.
- [Her 2013] Maria Hering, Steffen Großmann, Joachim Speck und Uwe Riechert. „Untersuchungen zum Verhalten von Isolatoren in gasisolierten Systemen bei Gleichspannungsbelastung“. In: *ETG Fachbericht 140 zur Fachtagung "Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen"* (2013).
- [Hig 1978] N. Higuchi, T. Ogasawara und S. Seike. *Electrical insulators*. US Patent 4,112,193. 1978.

- [Hin 2011] Volker Hinrichsen und Andreas Küchler. „Grundlagen der Feldsteuerung“. In: *ETG Fachbericht 131 zur Konferenz Feldsteuerung in elektrischen Isoliersystemen in Darmstadt* (2011).
- [Hin 2012] Volker Hinrichsen. *Metalloxid-Ableiter in Hochspannungsnetzen - Grundlagen, 3. Auflage*. Herausgegeben von Siemens AG - Energy Sector Erlangen und Berlin. 2012.
- [Hwa 2011] Sang-Ha Hwang, Young-Bin Park, Kwan Han Yoon und Dae Suk Bang. *Nanotechnology and Nanomaterials: Carbon Nanotubes - Synthesis, Characterization, Applications, edited by Siva Yellampalli*. Herausgegeben von InTech Open Science. 2011. ISBN: 978-9-53307-497-9.
- [Kah 1989] Manfred Kahle. *Elektrische Isoliertechnik*. Springer Verlag, 1989. ISBN: 978-3-54019-369-2.
- [Kem 2011] Stefan Kempen und Steffen Lang und Friedhelm Pohlmann. „New Grading Material Enables Optimized Design of End Corona Protection for Large Rotating Machines“. In: *17th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Hannover* (2011).
- [Kil 2002] Cetin Kilic und Alex Zunger. „Origins of Coexistence of Conductivity and Transparency in SnO<sub>2</sub>“. In: *Physical Review Letters* Vol. 88.No. 9 (2002). ISSN: 0031-9007.
- [Koc 2012] Hermann Koch. *Gas-Insulated Transmission Lines*. Wiley/IEEE, 2012. ISBN: 978-0-470-66533-6.
- [Kre 1995] F.H. Kreuger. *Industrial high DC voltage*. Delfth University Press, 1995. ISBN: 90-407-1110-0.
- [Küc 2009] Andreas Küchler. *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-54078-412-8.
- [Küp 1984] Karl Küpfmüller. *Einführung in die theoretische Elektrotechnik*. Spinger Verlag, 1984.

- [Lan 2013] Steffen Lang. „Höchstleistungswerkstoffe für energieeffiziente Generatoren durch Einsatz innovativer Endenglimmschutzsysteme“. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2013.
- [Lau 1894] *Die Energie-Übertragung Lauffen-Frankfurt 1891. Offizieller Bericht über die Internationale Elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt am Main.* Herausgegeben vom Vorstand der Ausstellung. J. D. Sauerländers Verlag, Frankfurt am Main, 1894, 1894.
- [Led 2009] Christoph Lederle. „Isoliervermögen SF<sub>6</sub>-isolierter Elektrodenanordnungen mit dielektrischer Beschichtung“. Dissertation. Technische Universität München, 2009.
- [Lut 2011] Bernhard Lutz. „Einflussfaktoren auf die elektrische Feldverteilung in Isoliersystemen mit polymeren Isolierstoffen bei Gleichspannungsbelastung“. Dissertation. Technische Universität München, 2011.
- [Man 1980] C. W. Mangelsdorf und C. M. Cooke. „Bulk charging of epoxy insulation under DC stress“. In: *IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston* (1980), Seiten 146–149.
- [Mao 2013] Wenfeng Mao, Bangyun Xiong, Yong Liu und Chunqing He. „Correlation between defects and conductivity of Sb-doped tin oxide“. In: *Applied Physics Letters* Vol. 103 (2013). ISSN: 0003-6951.
- [Mei 1995] H. Meinecke. „High voltage gas insulated switchgear: an overview“. In: *IEE Colloquium on GIS (Gas-Insulated Switchgear) at Transmission and Distribution Voltages* Vol. 203 (1995).
- [Mer 2011] Merck KGaA. *Sicherheitsdatenblatt zu Artikelnummer 141134 - Minatec SCM E12 - Version 1.0.* 2011.
- [Mes 2002a] F. Messerer, M. Finkel und W. Boeck. „Surface Charge Accumulation on HVDC-GIS-Spacer“. In: *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation* (2002). Boston, MA USA, April 7-10, 2002.
- [Mes 2002b] Frank Messerer. „Gas-insulated substation (GIS) for HVDC“. Dissertation. Technische Universität München, 2002. ISBN: 3-18-331921-7.

- [Mey 2004] B. K. Meyer et al. „Bound exciton and donor–acceptor pair re-combinations in ZnO“. In: *Phys. Status Solidi* Vol. 241 (2004), Seiten 231–260. ISSN: 1521-3951.
- [Mom 2011] Momentive Speciality Chemicals. *Technical Datasheet EPIKOTE Resin 162 + EPIKURE Curing Agent 868*. 2011.
- [Mos 1979] Wolfgang Mosch und Wolfgang Hauschild. *Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid*. VEB Verlag Technik, Berlin; Ausgabe des Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1979. ISBN: 3-778-50540-8.
- [Mül 2012] Daniel Müllegger. „Untersuchung und Simulation der elektrischen Eigenschaften von Mikrovaristormaterialien“. Dissertation. Technische Universität München, 2012.
- [Nak 1983] K. Nakanishi, A. Yoshioka, Y. Arahata und Y. Shibuya. „Surface Charging on Epoxy Spacer at DC Stress in Compressed SF<sub>6</sub> Gas“. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS-102 (1983), Seiten 3919–3927. ISSN: 0018-9510.
- [Neu 2012] Claus Neumann. *Hochspannungs-Schaltgeräte und -Anlagen. Skript zur Vorlesung, TU Darmstadt, FG Hochspannungstechnik*. 2012.
- [NIS 2013] NIST - National Institute of Standards und Standard Reference Data Technology USA. *Thermophysical Properties of Fluid Systems - Sulfur Hexafluoride*. Abgerufen am 10. Oktober 2013. 2013. url: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
- [Pfa 2007] Gerhard Pfaff. *Spezielle Effektpigmente*. Vincentz Network, 2007. ISBN: 978-3-86630-895-4.
- [Phi 1977] H. R. Philipp und Lionel M. Levinson. „Low-temperature electrical studies on metal-oxide varistors - A clue to conduction mechanisms“. In: *Journal of Applied Physics*. Journal of Applied Physics 48 (1977), Seiten 1621–1627.
- [Pik 1982] G. E. Pike. „Electronic Properties of ZnO Varistors. A new Model“. In: *Grain Boundaries in Semiconductors*. Materials Research Society Symposia Proceedings Vol. 5 (1982), Seiten 369–379.

- [Rie 2001] Uwe Riechert. „Eignung von Polyethylen für Gleichspannungs-Energiekabel“. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2001. ISBN: 978-3-83220-373-3.
- [Rie 2013] Uwe Riechert und Per Skarby. „Entwicklung gasisolierter Systeme für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)“. In: *Fachtagung des GIS-Anwenderforums, Technische Universität Darmstadt, 01.10.2013* (2013).
- [Rüg 2012a] Reinhold Rüger. „Eco Generator-X: Hochleistungswerkstoffe für energieeffiziente Generatoren durch Einsatz innovativer Enden-glimmschutzsysteme“. In: *BMBF Branchendialog, Düsseldorf* (2012).
- [Rüg 2012b] Reinhold Rüger. „Halbleitende Metalloxid-Pigmente mit nichtlinearen elektrischen Eigenschaften“. In: *Tagungsband der 5. RCC Fachtagung 2012 in Falkensee* (2012), Seiten 117–122.
- [Sch 1994] Hanno Schaumburg. *Keramik. Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik. Band 5*. Teubner Verlag, 1994.
- [Sch 2013] M. Schueller und C. M. Franck. „Influence of the Gas Volume Size on Spacer Charging in SF<sub>6</sub> under DC Stress“. In: *18th International Symposium on High Voltage Engineering, Seoul, Korea. OE7-06* (2013), Seiten 1375–1380. ISSN: 0018-9510.
- [Sei 2008] J. Seifert, V. Hinrichsen, J. Debus, M. Clemens, D. Weida und M. Hagemeister. „Einsatz von Feldsteuermaterialien in Hochspannungs-isolatoren - Potentiale und Risiken“. In: *ETG Workshop "Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften"*, Stuttgart (2008).
- [Sei 2011] J. Seifert und M. Clemens. „Praxis-Erfahrungen mit feldgesteuerten Verbund-Isolatoren in der Produktion und Anwendung“. In: *ETG Fachbericht 131 "Feldsteuernde Isoliersysteme"*, Darmstadt (2011).
- [Sol 2013] Solvay Fluor GmbH. *Schwefelhexafluorid, German Product Information*. Abgerufen am 10. Oktober 2013. 2013. url: [http://www.solvaychemicals.com/Chemicals%20Literature%20Documents/Fluor/F-Specs/Schwefelhexafluorid\\_DE.pdf](http://www.solvaychemicals.com/Chemicals%20Literature%20Documents/Fluor/F-Specs/Schwefelhexafluorid_DE.pdf).
- [Str 1987] Peter Strassacker. „Ein defektchemisches Modell für Zinkoxid-Varistoren“. Dissertation. VDI Fortschrittsberichte, Reihe 21, Band 20, 1987.



- [Str 2000] Robert Strobl, Wolfgang Haverkamp und Gerold Malin. „I(O)XSU-F - Neue Generation wärmeschrumpfender Mittelspannungsendverschlüsse basierend auf ZnO - Technologie“. In: *Elektrizitätswirtschaft, Jg. 99* 26 (2000), Seiten 68–71.
- [Str 2012] U. Straumann, M. Schueller und C. M. Franck. „Theoretical Investigation of HVDC Disc Spacer Charging in SF6 Gas Insulated Systems“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 19 (2012), Seiten 2196–2205. ISSN: 1070-9878.
- [Stü 1987] F. Stücki, P. Broesch und F. Greuter. „Electron Spectroscopic Studies of Electrically Active Grain Boundaries in ZnO“. In: *Proceedings of the 9th European Conference on Surface Science, Luzern, Switzerland* Vol. 189-190 (1987), Seiten 294–299.
- [Tao 1993] Jing Tao. „Surface Charge Accumulation in SF6“. Dissertation. TU Delft, 1993. ISBN: 90-6275-848-7.
- [Vol 2004] Evgeni Volpov. „Dielectric Strength Coordination and Generalized Spacer Design Rules for HVAC/DC SF6 Gas Insulated Systems“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No.6* (2004), Seiten 949–963. ISSN: 1070-9878.
- [Wac 2008] Wacker Chemie GmbH München. *Wacker SLM 79049 HTV-Silikonkautschuk für nichtlineare Feldsteuerung in elektrotechnischen Anwendungen, Vorläufiges Datenblatt*. 2008.
- [Wal 2012] Christian Wallner. „1968 - 2012: Kontinuierliche Innovation bei gasisolierten Schaltanlagen bis zur kompakten 420 kV Anlage“. In: *Fachtagung des GIS-Anwenderforums, Technische Universität Darmstadt, 25.09.2012* (2012).
- [Web 2009] K.G. Webber, E. Aulbach, T. Key, M. Marsilius, T. Granzow und J. Rödel. „Temperature-dependent ferroelastic switching of soft lead zirconate titanate“. In: *Acta Materialia* Vol. 57 (2009), Seiten 4614–4623.
- [Win 2011] Axel Winter, Michael Tenzer, Josef Kindersberger und Volker Hinrichsen. „Simulation leitfähig eingestellter Isoliersysteme für Hochfeldbeanspruchung in gasisolierten Anlagen bei Gleichspannung“.

- In: *ETG Workshop "Feldsteuernde Isoliersysteme"*, 22. + 23. November 2011, Darmstadt (2011).
- [Win 2012] Axel Winter und Josef Kindersberger. „Stationary Resistive Field Distribution along Epoxy Resin Insulators in Air under DC Voltage“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 19, No. 5 (2012), Seiten 1732–1739. ISSN: 1070-9878.
- [Win 2014] Axel Winter und Josef Kindersberger. „Transient Field Distribution in Gas-Solid Insulation Systems under DC Voltages“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 21 No. 1 (2014), Seiten 116–128.

## Normen und technische Richtlinien

- [IEC 60060-1] IEC 60060-1. *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements. Edition 3.0 (2010-09)*. International Electrotechnical Commission.
- [IEC 60071-1] IEC 60071-1. *Insulation Co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules, Edition 8 (2006-01), IEC 60071-1:2006*. International Electrotechnical Commission.
- [IEC 60071-2] IEC 60071-2. *Insulation Co-ordination - Part 2: Application guide, Edition 3 (1996-12), IEC 60071-2:1996*. International Electrotechnical Commission.
- [IEC 60093] IEC 60093. *Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials. Edition 2.0 (1980)*. International Electrotechnical Commission.
- [IEC 60099-4] IEC 60099-4. *Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. Edition 3.0 (2014-06)*. International Electrotechnical Commission.
- [IEC 60099-9] IEC 60099-9. *Surge arresters - Part 9: Metal-oxide surge arresters without gaps for HVDC converter stations. Edition 1.0 (2014-06)*. International Electrotechnical Commission.

- [IEC 62271-1] IEC 62271-1. *High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications, Edition 1.1 (2011-08), IEC 62271-1:2007 + A1:2011*. International Electrotechnical Commission.
- [IEC 62607-2-1] IEC 62607-2-1. *Nanofertigung – Schlüsselmerkmale - Teil 2-1: Materialien aus Kohlenstoff-Nanoröhren – Schichtwiderstand, Edition 1.0 (2012-05), IEC/TS 62607-2-1:2012*. International Electrotechnical Commission.



## Eigene Publikationen

- [Ten 2010] **M. Tenzer**, J. Debus, V. Hinrichsen: *Mikrovaristorgefüllte Isoliersysteme bei Gleichspannungsbeanspruchung*. ETG Fachtagung „Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung“, 27. September - 28. September 2010, Köln, Germany. Tagungsband, ISBN 978-3-8007-3278-4.
- [Deb 2011] J. Debus, **M. Tenzer**, V. Hinrichsen: *Verbundlangstabilisatoren mit mikrovaristorgefüllten Silikonelementen*. 3. Burghauser Isolierstoff-Kolloquium, 9. & 10. Juli 2011, Wacker-Chemie, Burghausen, Germany. Tagungsband.
- [Ten 2011a] **M. Tenzer**, V. Hinrichsen: *Investigations on Microvaristor-Filled Polymeric Insulating Materials Focused on DC Applications*. 22nd Nordic Insulation Symposium, June 13-15, 2011, Tampere, Finland. Tagungsband, ISBN 978-952-15-2562-9.
- [Ten 2011b] **M. Tenzer**, V. Hinrichsen: *Investigations on Microvaristors as Functional Fillers in Insulation Systems for HVDC Applications*. ISH 2011, August 22nd - 26th 2011, Hannover, Germany. Tagungsband, ISBN 978-3-8007-3364-4.
- [Win 2011] A. Winter, **M. Tenzer**, J. Kindersberger, V. Hinrichsen: *Simulation leitfähig eingestellter Isoliersysteme für Hochfeldbeanspruchung in gasisolierten Anlagen bei Gleichspannung*. ETG Workshop „Feldsteuernde Isoliersysteme“, 22. & 23. November 2011, Darmstadt, Germany. Tagungsband, ISBN 978-3-8007-3390-3.

- [Ten 2013a] **M. Tenzer**, M. Secklehner, V. Hinrichsen: *Short and Long Term Behavior of Functionally Filled Polymeric Insulating Materials for HVDC Insulators in Compact Gas Insulated Systems*. 23rd Nordic Insulation Symposium, June 9-12 2013, Trondheim, Norway. Tagungsband, ISBN 978-82-321-0274-7.
- [Ten 2013b] **M. Tenzer**, A. Winter, V. Hinrichsen, J. Kindersberger, D. Imamovic: *Compact Gas-Solid Insulating Systems for High-Field-Stress in HVDC Applications*. CIGRE Study Committee B3 & Study Committee D1 Colloquium, 9-11 September 2013, Brisbane, Australia. Tagungsband.
- [Ten 2013c] **M. Tenzer**, M. Secklehner, V. Hinrichsen, D. Imamovic: *Funktionell gefülltes Epoxidharz für HGÜ-Anwendungen in kompakten Isoliersystemen*. 4. ETG-Fachtagung „Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen“, 12.-13. November 2013, Dresden, Germany. Tagungsband, ISBN 978-3-8007-3557-0
- [Win 2014b] A. Winter, J. Kindersberger, **M. Tenzer**, V. Hinrichsen, L. Zavattoni, O. Lesaint, M. Muhr, D. Imamovic: *Solid/Gaseous Insulation Systems for Compact HVDC Solutions*. CIGRE Paris Session, 24.-29. August 2014, SC D1: Material and Emerging Test Techniques, PS 1: Electrical Insulation Systems under DC Voltage. 2014 Paris, France.

# Betreute Diplom-, Master-, Studien- und Bachelorarbeiten

Folgende Diplom-, Master-, Studien- und Bachelorarbeiten wurden im Rahmen dieser Arbeit am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt angefertigt und stellen einen Teil der hier gezeigten Ergebnisse dar:

- [Kar 2010] Sebastian Karach, Studienarbeit Nr. 1839: *Modellierung von Isolierwerkstoffen mit nichtlinearer Leitfähigkeit und deren Auswirkung auf Oberflächenladungen auf HGÜ-Isolatoren unter Verwendung der FEM-Simulationssoftware Comsol Multiphysics®*, Darmstadt, 2010.
- [Jan 2010] Henning Janssen, Bachelorarbeit Nr. 1848: *Untersuchung des Einflusses verschiedener Isolierwerkstoffe mit und ohne Außenbeschichtung auf die Oberflächenladungscharakteristik bei HGÜ Isolatoren unter Verwendung der FEM Simulationssoftware Comsol Multiphysics®*, Darmstadt, 2010.
- [Mah 2011] Sara Mahdavi, Masterarbeit Nr. 1851: *Design and implementation of a test setup for the evaluation of the electrical strength of different GRP insulators as well as measurements and evaluation of different test specimen samples regarding their suitability as high voltage insulator core material*, Darmstadt, 2011.
- [Kar 2011] Sebastian Karach, Diplomarbeit Nr. 1860: *Messtechnische Ermittlungen zur Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit diverser mikrovaristorgefüllter Polymere bei Gleichspannungsbeanspruchung*, Darmstadt, 2011.

- [Djo 2012] Danilo Djordjevic, Bachelorarbeit Nr. 1859: *FEM Simulation transien-ter Spannungsbeanspruchungsvorgänge (Blitz-/Schaltstoß) und Umpol-vorgänge in Kombination mit nichtlinear leitfähigen Isolierwerkstoffen*, Darmstadt, 2012
- [Wen 2012] Markus Wenzel, Bachelorarbeit Nr. 1874: *Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchstandes zur beschleunigten Alterung mikrovaristorgefüll-ter Polymere*, Darmstadt, 2012.
- [Sec 2012] Maximilian Secklehner, Diplomarbeit Nr. 1883: *Untersuchung des Al-terungsverhaltens mikrovaristorgefüllter Polymere sowie Analyse der auftretenden Phänomäne bei Gleichspannungsbeanspruchung*, Darm-stadt, 2012.
- [Pro 2013] Jan Oliver Prochaska, Studienarbeit Nr. 1892: *Aufbau und Inbetrieb-nahme eines Versuchstandes zur Ermittlung des Verhaltens mikrovaris-torgefüllter Polymere bei impulsförmigen Beanspruchungen (Stoßstrom und Stoßspannung)*, Darmstadt, 2013.
- [Hoc 2013] Peter Hock, Bachelorarbeit Nr. 1899: *Untersuchung der elektrischen Kurz- und Langzeiteigenschaften funktionell gefüllter Polymere für Gleichspannungs-Hochfeldanwendungen*, Darmstadt, 2013.



# Lebenslauf

Michael Tenzer,  
geboren am 22. März 1981  
in Bensheim an der Bergstraße



## Werdegang

Seit 05/2014	Projekt-Manager im Bereich Forschung & Entwicklung bei der Siemens AG in Erlangen
05/2009 bis 04/2014	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Darmstadt am Fachgebiet Hochspannungstechnik
11/2008 bis 04/2009	Diplomarbeit an der Technischen Universität Darmstadt am Fachgebiet Hochspannungstechnik
10/2002 bis 04/2009	Studium der Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität Darmstadt
05/2001	Erlangung der allgemeinen Hochschulreife (Abitur) am Goethe-Gymnasium in Bensheim an der Bergstraße

07. Juli 2014



## **Erklärung laut § 9 PromO**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe. Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, den 07. Juli 2014

Michael Tenzer